

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.1053

曹晶, 高思佳, 储昭升, 等. 2015. 鄱阳湖悬浮颗粒物絮凝沉降典型藻类的动力学研究[J]. 环境科学学报, 35(5): 1325-1332

Cao J, Gao S J, Chu Z S, et al. 2015. Study on kinetics of flocculation and settlement between typical algae and suspended particulates in Poyang Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(5): 1325-1332

鄱阳湖悬浮颗粒物絮凝沉降典型藻类的动力学研究

曹晶^{1,2}, 高思佳², 储昭升^{2,*}, 王毅力³

1. 天津科技大学生物工程学院, 天津 300457

2. 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地/国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

3. 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083

收稿日期: 2014-06-13

修回日期: 2014-12-05

录用日期: 2014-12-17

摘要: 为了探讨鄱阳湖水动力条件改变引起的悬浮颗粒物浓度变化可能导致的鄱阳湖浮游植物群落结构的变化, 本文研究了鄱阳湖悬浮颗粒物絮凝沉降 3 种典型藻类的动力学过程。以铜绿微囊藻(蓝藻)、四尾栅藻(绿藻)和菱形藻(硅藻)为研究对象, 鄱阳湖采集沉积物为悬浮颗粒物, 使用混凝试验搅拌机模拟动力学条件, 在颗粒物投加量为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时分别研究了静置沉降时间、扰动强度和扰动时间对颗粒物絮凝沉降藻细胞的影响。结果表明, 絮凝沉降效率: 蓝藻 > 绿藻 > 硅藻。在扰动强度为 20 s^{-1} 、扰动时间为 30 min 时, 0.5~4 h 静置沉降时间均促进 3 种藻类的絮凝沉降。绿藻和硅藻的絮凝沉降效率随着静置沉降时间的延长而降低, 前 0.5 h 的絮凝沉降效率最大; 而蓝藻的絮凝沉降效率变化无明显规律。扰动时间和静置沉降时间均为 30 min 时, 随着扰动强度在 $2 \sim 40 \text{ s}^{-1}$ 增加时, 3 种藻的絮凝沉降效率逐渐增大。扰动强度为 20 s^{-1} 、静置沉降时间为 30 min 时, 5~60 min 扰动时间均促进藻细胞的絮凝沉降, 并且随着扰动时间的增加, 絮凝沉降效率呈先增大后降低的趋势。30 min 为蓝藻絮凝沉降的最佳扰动时间, 絮凝沉降效率为 12.56%; 45 min 为绿藻和硅藻絮凝沉降的最佳扰动时间, 絮凝沉降效率分别为 11.93% 和 7.54%。因此, 水动力条件的改变可以引起悬浮颗粒物与藻类的絮凝沉降效率发生变化, 从而对藻类的群落结构以及水华发生规律产生影响。

关键词: 水动力; 悬浮颗粒物; 絮凝沉降; 藻细胞

文章编号: 0253-2468(2015)05-1325-08

中图分类号: X524

文献标识码: A

Study on kinetics of flocculation and settlement between typical algae and suspended particulates in Poyang Lake

CAO Jing^{1,2}, GAO Sijia², CHU Zhaosheng^{2,*}, WANG Yili³

1. College of Biotechnology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457

2. Research Center of Lake Eco-Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences/State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Beijing 100012

3. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083

Received 13 June 2014;

received in revised form 5 December 2014;

accepted 17 December 2014

Abstract: In order to investigate the effect of the suspended particulate concentration variation caused by hydrodynamic conditions of Poyang Lake on the phytoplanktonic community structure shift, the kinetics of flocculation and settlement of three type of algae cells, *Microcystis aeruginosa* (cyanobacteria), *Scenedesmus quadricauda* (green algae) and *Nitzschia* (diatoms), caused by suspended particulates from Poyang Lake was studied. The impact of the settling time, agitation strength and time on the efficiency of algae flocculation and settlement was also studied by using jar test, under the dosage of suspended particles at $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The results showed that the order of flocculation and settlement efficiency was cyanobacteria > green algae > diatoms. When the agitation strength was 20 s^{-1} and the agitation time was 30 min, the settlement of algae cells increased with the settling time from 0.5 h to 4 h. While the efficiency of flocculation-settlement for green algae and diatoms decreased with the extension of settling time, and the maximum value was observed within 0.5 h duration. But for *Cyanobacteria* cells, their flocculation-settlement efficiency fluctuated erratically during the period of settlement. As both the agitation time and settling time were 30 min, the efficiency of flocculation-settlement for algae cells gradually increased with the rise of agitation strength ranged from $2 \sim 40 \text{ s}^{-1}$. The variations of agitation duration from 5 to 60 min in jar tests at 20 s^{-1} of agitation strength and 30 min of settlement

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (No.2012CB417004); 国家自然科学基金 (No.51078341, 50938007)

Supported by the National Basic Research Program of China (No.2012CB417004) and the National Natural Science Foundation of China (No.51078341, 50938007)

作者简介: 曹晶 (1989—), 女, E-mail: 36290144@qq.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: chuza@ craes.org.cn

Biography: CAO Jing (1989—), female, E-mail: 36290144@qq.com; * **Corresponding author**, E-mail: chuza@ craes.org.cn

duration were also beneficial for the efficiency of flocculation-settlement for algae cells, which increased at first, and then decreased as the extension of agitation duration. Furthermore, the optimum agitation duration for *Cyanobacteria* flocculation-settlement was 30 min, and the corresponding efficiency was 12.56%. For green algae and diatoms, the optimum agitation durations were determined at 45 min with efficiency of 11.93% and 7.54%, respectively. On the basis of above results, it can be proposed that the changes in hydrodynamic conditions can lead to the variations of the flocculation-settlement efficiency for suspending particulates and algae cells, which could affect the Poyang Lake algae community structure, and even the regulation of blooms later.

Keywords: hydrodynamic; suspended particulates; flocculation and settlement; algae cells

1 引言 (Introduction)

水动力作用在水环境的演化中扮演着非常重要的角色,决定着营养盐、污染物质、泥沙与沉积物的传输与分布,对湖泊生态系统有着深远和复杂的影响,已经成为浮游植物动态变化、水华暴发的重要驱动因子(金相灿和屠清瑛,1990;颜润润等,2008a).近年来,一些学者在水动力对藻类生长的影响方面开展了大量的研究工作并取得了一定的进展,发现不同水动力条件对藻细胞生长的影响效果不同(Arin *et al.*, 2001; Ding *et al.*, 2007; 王华和逢勇,2008; Long *et al.*, 2011; 李林和朱伟,2012).然而上述研究很少涉及水动力对颗粒物絮凝沉降藻细胞的影响方面的内容.

国内外学者研究了不同种类颗粒物对藻细胞絮凝沉降的影响,发现颗粒物与藻细胞的表面电性和粒度是影响它们絮凝效果的重要因子(Yu *et al.*, 1995; 孙晓霞等,1999; Pan *et al.*, 2011a; Pan *et al.*, 2011b).然而,从絮凝动力学的观点来看,水动力条件对上述颗粒物与藻类的絮凝效果也会产生重要的影响,决定着它们之间的碰撞效率.此外,絮体的成长和破碎过程几乎是同时进行的(刘明华,2011),一般情况下,动水水流可以提高颗粒物的相互碰撞,促进絮凝作用的发生,同时动力水流又会产生剪切破坏作用,使得一些结合较弱的絮凝颗粒发生破碎(吴荣荣等,2007).

鄱阳湖承纳赣江、抚河、信江、饶河、修水五大河流,汇入长江,受五河、长江水位制约,沉积物颗粒含量高且变化复杂(马逸麟等,2003),会对颗粒物絮凝藻细胞产生不同的作用效果,进而影响水华的暴发.针对上述问题,本文采用鄱阳湖悬浮颗粒物对湖泊中典型蓝藻、绿藻和硅藻进行絮凝沉降试验,研究悬浮颗粒物在不同静置时间、扰动强度(速度梯度)和时间作用下对上述絮凝沉降效果的影响,为鄱阳湖水华暴发的预测提供基础数据与理论支撑.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 藻种与培养

3种典型的藻类:铜绿微囊藻(*Microcystis. aeruginosa*, 蓝藻)、四尾栅藻(*Scenedesmus. quadricauda*, 绿藻)、菱形藻(*Nitzschia*, 硅藻)均分离于太湖,在培养温度为(25±1)℃、光暗比12 h:12 h、光照强度3000 lx条件下接于10 L的玻璃瓶中(9 L的培养基)扩大培养1周左右至对数生长期备用.

2.2 悬浮颗粒物制备及指标测定

悬浮颗粒物采集自鄱阳湖(116°32'37"E, 29°09'55"N)沉积物,冷冻保存带回实验室经自然风干、研磨、过筛(300目)制备成悬浮颗粒物存于封口塑料袋中置于4℃冰箱备用(侯秀富等,2013).絮凝沉降实验开始时,将该颗粒物配制成浓度为5 g·L⁻¹的悬浊液,并水化1 d以上进行投加.悬浮颗粒物粒径使用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000)测定.颗粒物及藻类zeta电位使用zeta电位仪(Malvern, Zeta Sizer2000)测定,zeta电位结果见表1.

表1 颗粒物及藻类zeta电位

Table 1 Zeta potential of the suspended particulates and algae cells mV

<i>M. aeruginosa</i>	<i>S. quadricauda</i>	<i>Nitzschia</i>	颗粒物
-13.47	-12.40	-15.30	-21.97

2.3 实验流程与测试方法

采用智能型混凝试验搅拌机(MY 3000-6,潜江梅宇仪器有限公司)进行悬浮颗粒物对藻类的絮凝沉降试验.试验程序如下:分别移取藻细胞密度为2×10⁶ cells·mL⁻¹、1.5×10⁶ cells·mL⁻¹和2.5×10⁶ cells·mL⁻¹的蓝藻、绿藻和硅藻各30 mL、40 mL、30 mL于该搅拌仪的1 L烧杯中,加入M₁₁培养基,使烧杯内藻液体积达到500 mL、藻细胞密度为10⁵ cells·mL⁻¹,控制温度为(25±1)℃、光照强度为3000 lx,投加悬浮颗粒物(空白对照组不投加颗粒物)进行絮凝沉降实验,每组两个平行.湖泊水动力条件的模式是通过改变混凝试验搅拌机的搅拌转速和时间来实现.相应的试验条件见表2.

表 2 絮凝沉降实验参数

Table 2 Experimental parameters for flocculation-sedimentation process

实验组别	悬浊液浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	静置时间/ h	速度梯度/ s^{-1}	扰动时间/min
第一组	20	0.5、1.0、1.5、2、4	20	30
第二组	20	0.5	2、5、10、20、40	30
第三组	20	0.5	20	5、15、30、45、60

混凝搅拌结束后,迅速从烧杯取样口取 100 mL 混合液于 100 mL 的量筒中静置,静置结束后分别于液面下 2 cm 处取一定体积的上清液样品,用血球计数板(Minato TATAI)在光学显微镜下进行藻细胞计数,每次计数细胞 30~300 个,每个样品计数 3 次.用絮凝沉降效率(Flocculation-settlement efficiency, 定义为 FSE)反映颗粒物对藻类絮凝沉降效果,计算公式如下:

$$\text{FSE} = \left(\frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \right) - \left(\frac{C'_1 - C'_2}{C'_1} \times 100\% \right)$$

式中,FSE 为百分比; C_1 为实验开始时实验组的初始藻细胞密度; C_2 为静置结束后实验组上清液藻细胞密度; C'_1 为实验开始时空白对照组的初始藻细胞密

度; C'_2 为静置结束后空白对照组上清液藻细胞密度,单位均为 $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$.

絮体图像分别采用显微镜(Olympus CX31)和图像采集软件(Algacount-Mx, Shineso)进行拍照和分析.

3 结果(Results)

3.1 悬浮颗粒物粒径分布

悬浮颗粒物粒度分布如图 1 所示,中值粒径 D_{50} 为 $10.72\ \mu\text{m}$, $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 、 $10\sim 15\ \mu\text{m}$ 、 $15\sim 25\ \mu\text{m}$ 粒径的体积百分比分别为 19.42%、24.38%、18.36%、21.02%.

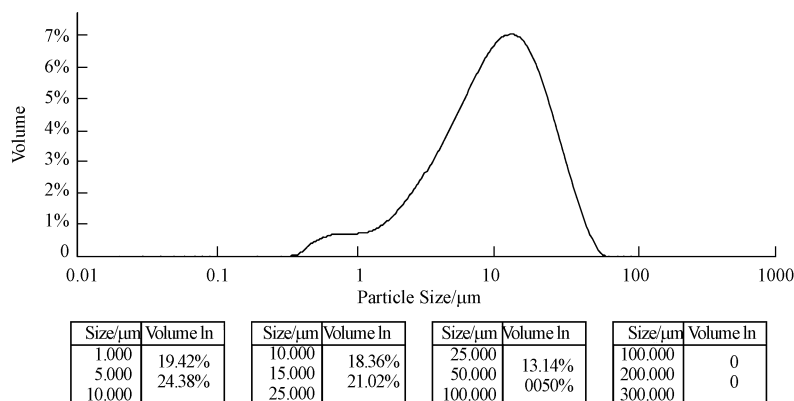


图 1 悬浮颗粒物的粒度分布

Fig.1 Suspended particulates size distribution

3.2 藻细胞及颗粒物-藻细胞絮体形貌

3.2.1 颗粒物及藻细胞形貌 图 2 是颗粒物和 3 种藻细胞形态及大小的光学显微照片,铜绿微囊藻细胞呈球形、椭圆形,1 个或 2 个群体生长,细胞较小,直径 $5\ \mu\text{m}$. 四尾栅藻细胞扁平,群体细胞并列直线排成一行或略作交互排列;细胞纺锤形,上下两端逐渐尖细,群体两侧细胞的游离面有时凹入,有时凸出,细胞壁平滑,一般成 2 个、4 个或 8 个群体生长,单个细胞长 $9\ \mu\text{m}$,宽 $4\ \mu\text{m}$. 菱形藻细胞为线型披

针形,两侧边缘近平行,两端逐渐狭窄,末端楔形;菱形藻单细胞长 $15\ \mu\text{m}$,宽 $4.5\ \mu\text{m}$,在生长过程中会自然絮凝成团,体积和质量较大.

3.2.2 颗粒物-藻细胞絮体形貌 图 3 为颗粒物-藻细胞絮体的显微图像.a、c、e 分别是铜绿微囊藻、四尾栅藻和菱形藻与颗粒物絮凝形成的絮体形态,相应的絮体大小分别约为 $100\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 和 $300\ \mu\text{m}$. b、d、f 分别是铜绿微囊藻、四尾栅藻和菱形藻单个絮体的放大图像,可以看到颗粒物与藻细胞通过相

互粘连形成絮体.

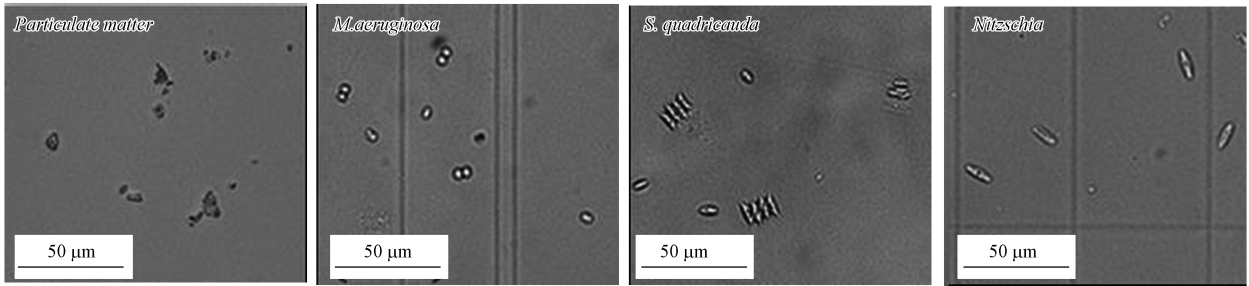


图 2 颗粒物及藻细胞的显微形貌

Fig.2 The microscopic morphology of algal cells and particulate matter

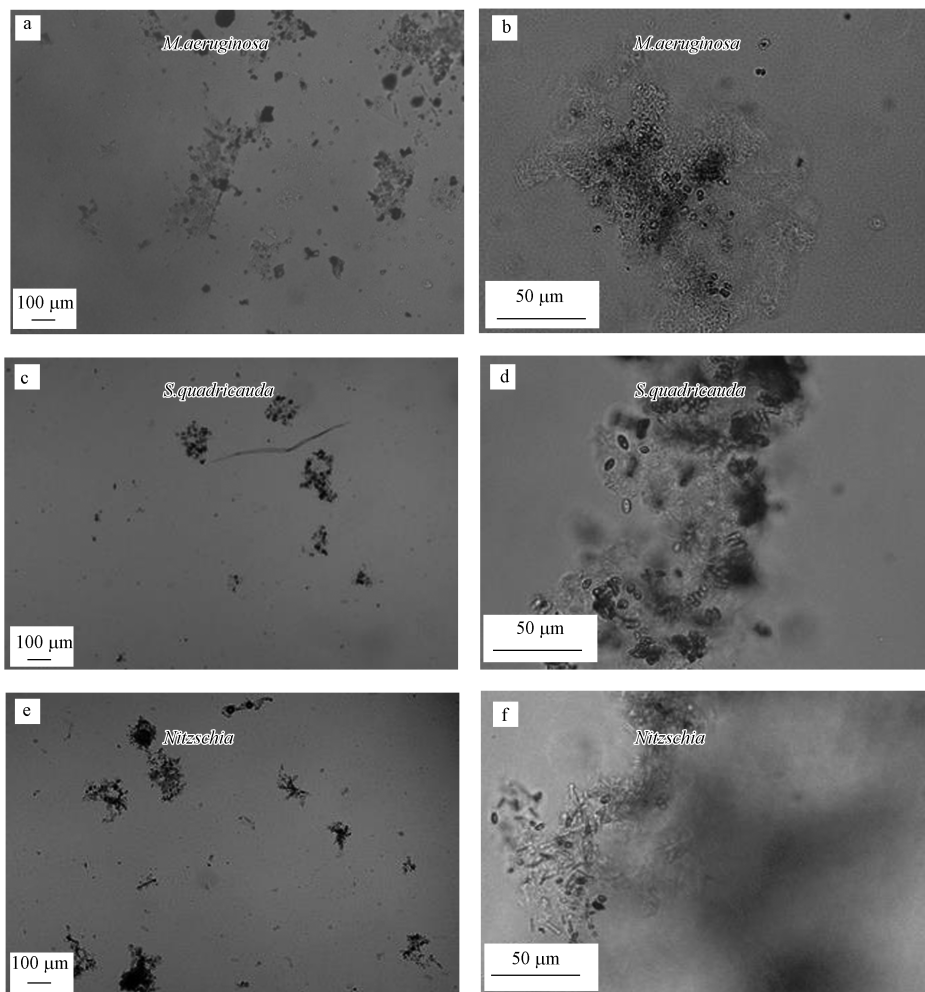


图 3 颗粒物-藻细胞絮体显微形貌

Fig.3 The microscopic morphology of particulate-algal cells floc

3.3 静置沉降时间对颗粒物絮凝沉降藻细胞的影响

絮凝过程完成后,混合液需要经过一段时间的静置沉降而完成固液分离过程.在 0.5~4 h 内,随着

静置时间的延长,3 种藻细胞数量逐渐减少,沉降的藻细胞数量逐渐增多(图 4);四尾栅藻和菱形藻的絮凝沉降效率随着静置时间的增加而减小,铜绿微囊藻的絮凝沉降效率先稳定后增大再减小(图 5).

由图 4 可见,不同静置时间下,相对于空白对照组,大部分藻细胞的密度均有不同程度的下降,而且,随着静置时间的延长,沉降程度开始逐渐增大然后趋于稳定.这种现象表明:悬浮颗粒物对藻类细胞具有絮凝作用,其中悬浮颗粒物对铜绿微囊藻和四尾栅藻的絮凝沉淀效果较为明显,而对菱形藻细胞在静置沉降 1 h 内有效果,超过 1 h,藻细胞密度反而

比空白对照样高.由图 5 的絮凝沉降效率曲线的变化也可以看出:悬浮颗粒物对铜绿微囊藻和四尾栅藻的絮凝沉降效果明显大于菱形藻.铜绿微囊藻的絮凝沉降在 2 h 达到最大 20.67%,之后开始下降;四尾栅藻和菱形藻的絮凝沉降效率在前 0.5 h 最大,随着静置沉降时间的延长均呈下降趋势.

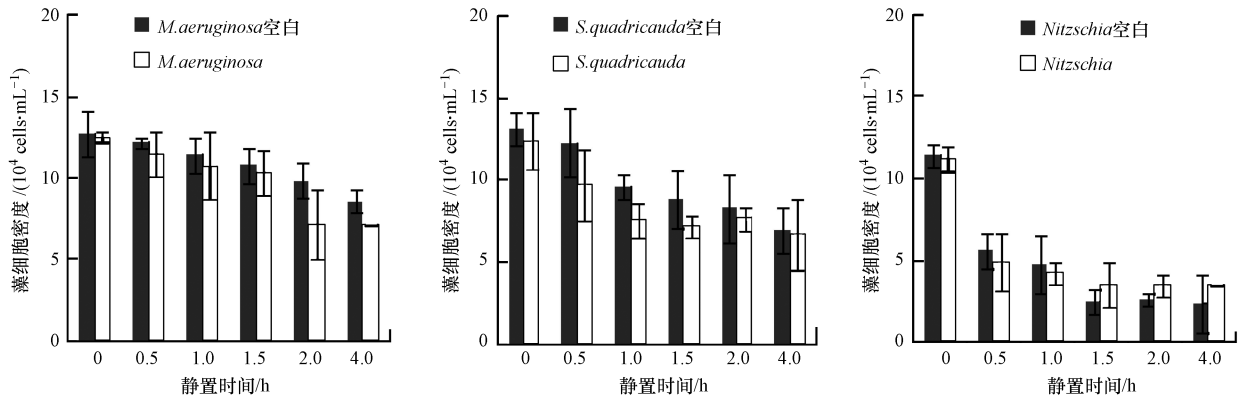


图 4 不同静置时间下藻细胞密度变化

Fig.4 Changes in algal cell density under different static duration

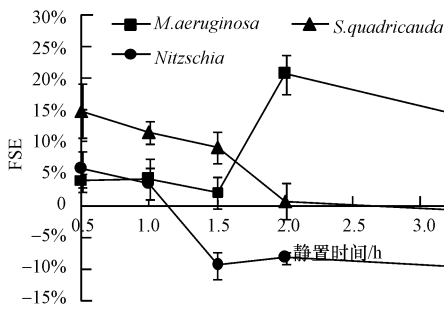


图 5 不同静置时间下藻类的絮凝沉降效率

Fig.5 Flocculation-settlement efficiency of algae under different static duration

3.4 扰动强度对悬浮颗粒物絮凝沉降藻细胞的影响

在模拟湖泊水力扰动条件下,藻细胞密度及絮凝沉降效率随速度梯度的变化见图 6、图 7.总体而言,2~40 s⁻¹范围内的扰动强度均促进藻类的絮凝沉降,并且随着扰动强度的增加,3 种藻细胞的絮凝沉降效率均呈增大趋势.空白对照组与实验组的藻细胞密度在各扰动强度作用下均呈减少趋势,说明扰动强度有助于藻类的絮凝沉降.当速度梯度小于 10s⁻¹,藻类的絮凝沉降效率增长较慢,随着速度梯

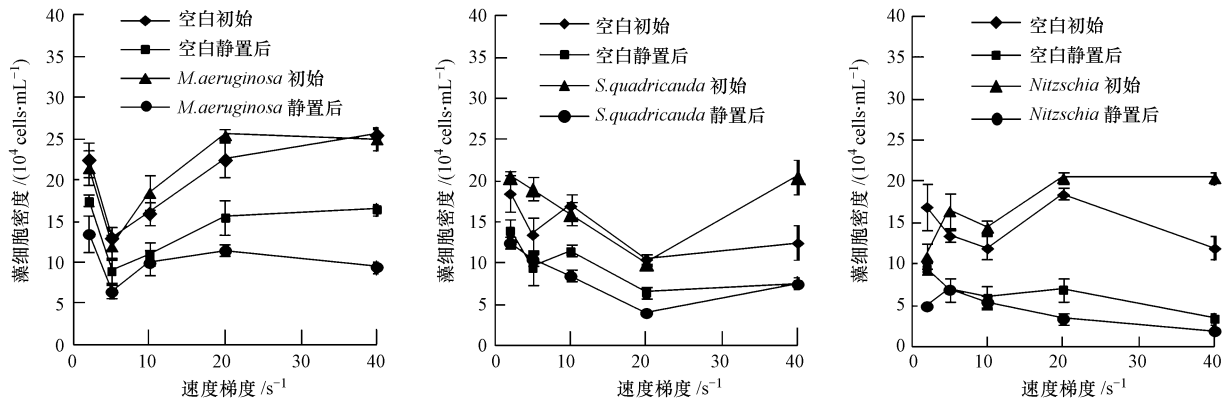


图 6 不同扰动强度作用下的藻细胞密度变化

Fig.6 Changes in algal cell density under the action of different hydraulic agitation strength

度从 10 s^{-1} 增加到 40 s^{-1} , 藻类的絮凝沉降效率呈现较快的增长趋势. 较大的扰动比较小的扰动更有利于藻类的絮凝沉降. 铜绿微囊藻、四尾栅藻和菱形藻的絮凝沉降效率分别从 2 s^{-1} 时的 15.37%、14.78% 和 8.97% 增加为 40 s^{-1} 时的 26.71%、23.79% 和 19.96%. 相应的絮凝沉降效果顺序依次为铜绿微囊藻 > 四尾栅藻 > 菱形藻.

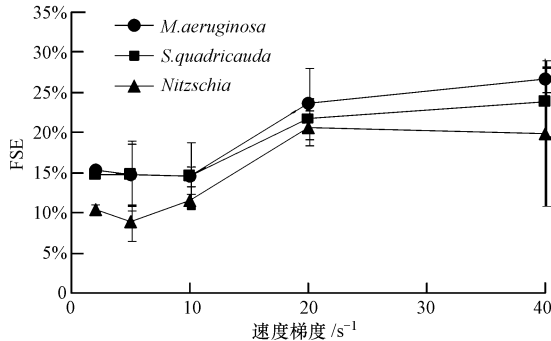


图7 不同扰动强度对藻类的絮凝沉降效率

Fig.7 Flocculation-settlement efficiency of algae under different hydraulic agitation strength

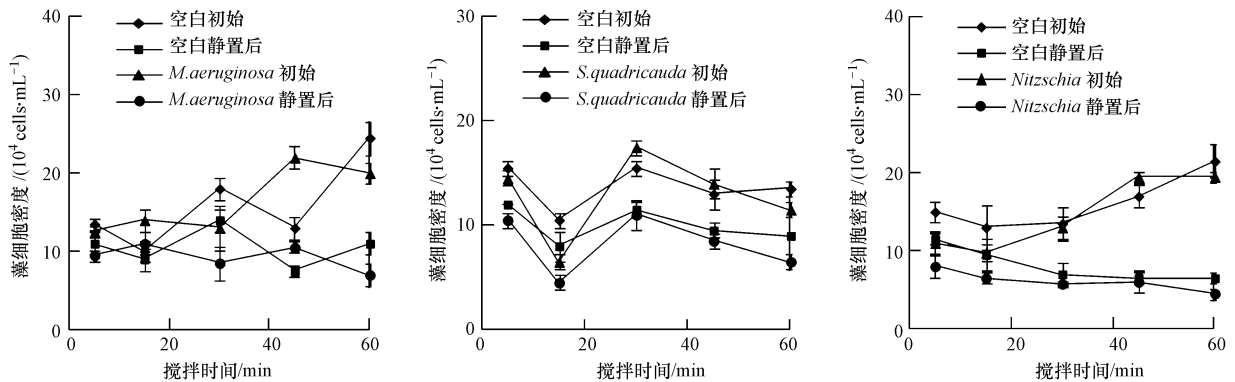


图8 不同扰动时间作用下的藻细胞密度变化

Fig.8 Changes in algal cell density under different hydraulic agitation duration

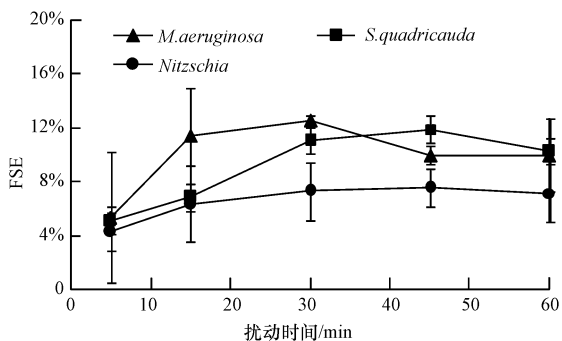


图9 不同扰动时间对藻类的絮凝沉降效率

Fig.9 Flocculation-settlement efficiency of algae under different hydraulic agitation duration

3.5 扰动时间对悬浮颗粒物絮凝沉降藻细胞效果的影响

依据表 2 的参数进行扰动时间的影响实验, 图 8 和图 9 分别列出了不同扰动时间下藻细胞密度和絮凝沉降效率的变化. 在静置时间 0.5 h、速度梯度 20 s^{-1} 时, 5~60 min 扰动时间范围均促进藻类的絮凝沉降, 并且随着扰动时间的增加, 3 种藻细胞的絮凝沉降效率均呈先增大后减小的趋势. 由图 8 可见, 相对于空白对照组, 实验组的藻细胞密度变化值(静置后值-初始值)均较大, 表明不同搅拌时间均促进颗粒物对藻细胞的絮凝沉降. 从图 9 絮凝沉降效率变化曲线可以看出: 30 min 最有利于铜绿微囊藻的絮凝沉降, 45 min 最有利于四尾栅藻和菱形藻的絮凝沉降, 三者的最大絮凝沉降效率分别为 12.56%、11.93% 和 7.54%. 30 min 之前, 铜绿微囊藻的絮凝沉降效率最大, 菱形藻最小; 30 min 后, 四尾栅藻的絮凝沉降效率最大, 菱形藻最小.

4 讨论 (Discussion)

颗粒大小及形状、颗粒所带电荷等对絮凝过程都会产生较为重要的影响(孙晓霞等, 1999). 颗粒的絮凝强弱与颗粒比表面积成正比, 颗粒粒径越小, 颗粒的比表面积越大, 絮凝作用越强(李富根, 2005). 本研究中的小粒径颗粒物所占体积比较大(图 1), 因此颗粒物对藻细胞的絮凝沉降作用较明显. 3 种藻及颗粒物的 zeta 电位均为负值(表 1), 相互间会产生排斥作用, 且电位的绝对值越大, 排斥力越强; 但颗粒物晶面上带负电荷而边缘带正电荷(颜润润等, 2008b), 在水中会形成双电层(阮文杰,

1991),絮凝过程可能是由颗粒物的边缘与藻细胞结合发生.而且颗粒物与藻细胞的絮凝并不只是依赖于二者的静电排斥力,还与范德华力、架桥作用以及布朗运动、流体切变、差速沉降等有关(Stumm and Margan, 1987).藻细胞表面会分泌粘性的胞外多糖,具有固沙及粘附作用(Robins *et al.*, 1986; 鲍康德等, 2005).Fattom 等指出,藻细胞由于表面胞外多糖依附于沉积物表面,与水体中的悬浮颗粒物结合发生共沉淀(Fattom and Shilo, 1984).本研究中颗粒物对铜绿微囊藻细胞的絮凝沉降效果最大,可能与微囊藻细胞表面胞外多糖的分泌量较多有关.另外,悬浮颗粒物发生絮凝时,也可能夹带包裹藻细胞共同沉降.

在 $2\sim 40\text{ s}^{-1}$ 速度梯度范围内,随着扰动强度增加,3 种藻的絮凝沉降效率增加.搅拌引起水体流动,流动状态是发生同向絮凝的水动力学条件(刘明华, 2011).在絮凝过程中,沉积物颗粒投到藻细胞培养液中,在温和的扰动条件下,沉积物颗粒首先进行分散,然后再与藻细胞接触碰撞,发生絮凝.低于 10 s^{-1} 的絮凝沉淀效率增长较慢,而大于 10 s^{-1} 的增长较快,是因为实验速度梯度范围处于絮凝操作的慢速搅拌的范围内,是同向絮凝为主要的动力学过程,因此速度梯度越大,越有利于絮凝过程(常青, 2011; 徐晓军, 2005).周海等(2007)进行了细颗粒泥沙絮凝沉降实验,研究了细颗粒泥沙动水絮凝沉降的基本特性,指出细颗粒泥沙在流动盐水中运动时,碰撞絮凝作用与剪切破碎作用同时存在,且都带有一定的随机性.絮凝体在下沉过程中可多次经受剪切破碎和碰撞再絮凝的作用,当流速相对较小时碰撞絮凝作用占优势.这与本研究结果相似.

在动力搅拌阶段,由于机械扰动使得体系一直处于运动状态,故体系以同向絮凝为主.同向絮凝效果不仅与速度梯度 G 有关,还与絮凝时间 T 有关.在絮凝沉降阶段,通常以 G 值和 GT 值作为控制指标,平均 $G=(20\sim 70)\text{ s}^{-1}$ 范围内,平均 $GT=1\times 10^4\sim 1\times 10^5$ 范围内(严煦世和范瑾初, 1999).本组试验 $G=20\text{ s}^{-1}$,所以 GT 为 $6\times 10^3\sim 7.2\times 10^4$, G 值和 GT 值均在要求范围内,所以能够发生絮凝作用.刘明华(2011)研究认为混凝的最佳反应时间 T 一般在 $10\sim 30\text{ min}$,适当搅拌时间使絮凝体逐渐形成并由小变大,絮体生长逐渐达到极限;缩短搅拌时间会使颗粒间的碰撞接触机会和颗粒运动减少,絮体来不及形成或变大;延长搅拌时间会使颗粒间的碰撞机会

增多,同时增加水流的剪切力,致使已经形成的絮体被多余的扰动破碎,降低絮凝沉降效率(刘恋, 2010; Moss and Dymond, 1978).

水动力条件是很多湖泊水华发生的重要影响因素,水动力降低会增加水华发生风险,如汉江水华就是在下游流量较少、流速较缓慢的时段发生的(Xie *et al.*, 2004),太湖蓝藻水华暴发一般均在稳定大风作用过后的小风或静风、天气晴朗时段(张毅敏等, 2007),说明缓慢水流有利于水华的暴发.在天然水体中,水动力增加可使水体悬浮颗粒物与藻细胞发生复杂的絮凝沉降作用,同时水动力增大也会增加水体颗粒物含量.颗粒物及藻细胞的大小、形态、浓度、zeta 电位以及水流剪切力等都会对颗粒物絮凝沉降藻细胞造成影响(王洪亮, 2010),水动力对藻类的絮凝沉降存在多方协同作用,如水动力增加会增大水体剪切力,改变颗粒物的大小、形态,增强颗粒物的碰撞效率等,从而影响絮凝沉降效率.水动力增大会使沉积物再悬浮,增加水体颗粒物浓度,增大颗粒物与藻类的碰撞几率,有可能降低水华发生风险.与其它两种藻细胞相比,铜绿微囊藻的絮凝沉降效率最大,这会使微囊藻水华发生的可能性小于四尾栅藻和菱形藻.

鄱阳湖作为大型通江湖泊,其氮磷含量虽然较高,但湖体流速大,水力停留时间短,目前浮游植物群落仍然以硅藻占据优势(王艺兵等, 2014),尚未发生大规模蓝藻水华.水体流速较大(Pan *et al.*, 2009)、水量交换快,水力停留时间较短(Zhu and Zhang, 1997; Wu *et al.*, 2014),水位变化幅度较大、浮游植物光合作用受限(Wu *et al.*, 2013)等是目前认为尚未发生大规模蓝藻水华的原因.本研究进一步说明水动力会影响颗粒物与藻细胞尤其是与蓝藻细胞的絮凝沉降作用,并影响蓝藻在湖泊形成优势及水华的发生.

5 结论(Conclusions)

1) 藻细胞性质、颗粒粒径及 zeta 电位等不同,使悬浮颗粒物对不同藻类絮凝沉降效果不同.铜绿微囊藻、四尾栅藻的絮凝沉降效果优于菱形藻,菱形藻的絮凝沉降效果较差.

2) 在实验设置的 $2\sim 40\text{ s}^{-1}$ 速度梯度范围内,3 种藻类的絮凝沉降效率随着扰动梯度的增加均呈增长趋势,相应的絮凝沉降效果顺序依次为铜绿微囊藻最佳,四尾栅藻居中,菱形藻最差.

3)5~60 min 范围内扰动时间均促进3种藻的絮凝沉降且存在一定的差异性.短时(5 min)和长时(60 min)扰动对3种藻类的絮凝沉降作用较小,中等时间(15~45 min)的扰动有利于藻类的絮凝沉降.

责任作者简介:储昭升(1973—),男,博士,中国环境科学研究院水环境研究所研究员,主要从事湖泊富营养化研究.E-mail: chuzs@craes.org.cn.

参考文献(References):

- Arin L, Marrasé C, Marr M, *et al.* 2001. Combined effects of nutrients and small-scale turbulence in a microcosm experiment, I. Dynamics and size distribution of osmotrophic plankton [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 29(1): 51-61
- 鲍康德, 张小平, 郑维发. 2005. 海洋浮游硅藻胞外多糖研究进展[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 28(2): 214-217
- 常青. 2011. 水处理絮凝学(第2版)[M]. 北京: 化学工业出版社. 4
- Ding L, Wu J Q, Pang Y, *et al.* 2007. Simulation study on algal dynamics based on ecological flume experiment in Taihu Lake, China [J]. *Ecological Engineering*, 31(3): 200-206
- Fattom A, Shilo M. 1984. Hydrophobicity as an adhesion mechanism of benthic cyanobacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 47(1): 135-143
- 侯秀富, 郭沛涌, 张华想, 等. 2013. 水体悬浮颗粒物对斜生栅藻生理生化及光合活性的影响[J]. *环境科学学报*, 33(5): 1446-1457
- 金相灿, 屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范(第2版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社. 107
- 李富根. 2005. 粘性泥沙悬浮体系絮凝特性的初步研究[D]. 北京: 清华大学. 100
- 李林, 朱伟. 2012. 连续水流和间歇水流对微囊藻生长的影响[J]. *环境科学与技术*, 35(10): 34-37
- 刘明华. 2011. 混凝剂和混凝技术[M]. 北京: 化学工业出版社. 4
- 刘恋. 2010. 改性粘土对城市富营养化水体中藻类的絮凝去除研究[D]. 广州: 华南理工大学. 46-47
- Long T Y, Wu L, Meng G H, *et al.* 2011. Numerical simulation for impacts of hydrodynamic conditions on algae growth in Chongqing Section of Jialing River, China [J]. *Ecological Modelling*, 222(1): 112-119
- 马逸麟, 熊彩云, 易文萍. 2003. 鄱阳湖泥沙淤积特征及发展趋势[J]. *资源调查与环境*, 24(1): 29-37
- Moss N, Dymond B. 1978. Flocculation: theory & application [J]. *Mine and Quarry Journal*, May. 1-9
- Pan B Z, Wang H J, Liang X M, *et al.* 2009. Factors influencing chlorophyll a concentration in the Yangtze-connected lakes [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 18(10): 1894-1900
- Pan G, Yang B, Wang D, *et al.* 2011a. In-lake algal bloom removal and submerged vegetation restoration using modified local soils [J]. *Ecological Engineering*, 37(2): 302-308
- Pan G, Chen J, Anderson D M. 2011b. Modified local sands for the mitigation of harmful algal blooms [J]. *Harmful Algae*, 10(4): 381-387
- Robins R J, Hall D O, Shi D J, *et al.* 1986. Mucilage acts to adhere cyanobacteria and cultured plant cells to biological and inert surfaces [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 34(2): 155-160
- 阮文杰. 1991. 细颗粒泥沙动水絮凝的机理分析[J]. *海洋科学*, (5): 46-49
- Stumm W, Margan J J. 1987. 水化学—天然水体化学平衡导论[M]. 北京: 科学出版社. 477
- 孙晓霞, 宋秀贤, 张波, 等. 1999. 粘土-MMH体系对赤潮生物的絮凝作用机制研究[J]. *海洋科学*, 13(2): 46-49
- 王华, 逢勇. 2008. 藻类生长的水动力学因素影响与数值仿真[J]. *环境科学*, 29(4): 884-889
- 王艺兵, 侯泽英, 叶碧碧, 等. 2014. 鄱阳湖浮游植物时空变化特征及影响因素分析[J/OL]. *环境科学学报*, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1843.X.20141218.1335.011.html>.
- 吴荣荣, 李九发, 刘启贞, 等. 2007. 钱塘江河口细颗粒泥沙絮凝沉降特性研究[J]. *海洋湖沼通报*, (3): 29-34
- Wu Z, Lai X, Zhang L, *et al.* 2014. Phytoplankton chlorophyll a in Lake Poyang and its tributaries during dry, mid-dry and wet seasons: a 4-year study [J]. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, (412): Article Number: 6
- Wu Z S, Cai Y J, Liu X, *et al.* 2013. Temporal and spatial variability of phytoplankton in Lake Poyang: The largest freshwater lake in China [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 39(3): 476-483
- Xie P, Xia J, Dou M, *et al.* 2004. Research into the effects of the middle route of China's south-to-north water transfer project on water bloom in the middle-down stream of Hanjiang River and the countermeasures Part I: An analysis of the key factors generating water bloom in Hanjiang River [J]. *Journal of Natural Resources*, 19(4): 418-423
- 徐晓军. 2005. 化学絮凝剂作用原理[M]. 北京: 科学出版社
- 颜润润, 逢勇, 陈晓峰, 等. 2008a. 不同风等级扰动对贫营养下铜绿微囊藻生长的影响[J]. *环境科学*, 29(10): 2749-2753
- 颜润润, 逢勇, 赵伟, 等. 2008b. 环流型水域水动力对藻类生长的影响[J]. *中国环境科学*, 28(9): 813-817
- 严煦世, 范瑾初. 1999. 给水工程(第4版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 12
- Yu Z M, Zou J Z, Ma X N. 1995. Application of clays to removal of red tide organisms III. The coagulation of kaolin on red tide organisms [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 13(1): 62-70
- 张毅敏, 张永春, 张龙江, 等. 2007. 湖泊水动力对蓝藻生长的影响[J]. *中国环境科学*, 27(5): 707-711
- 周海, 阮文杰, 蒋国俊, 等. 2007. 细颗粒泥沙动水絮凝沉降的基本特性[J]. *海洋与湖沼*, 38(2): 124-130
- 朱海虹, 张本. 1997. 鄱阳湖[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社