

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.1054

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

Cao J, Liu J H, Chu Z S, et al. 2015. The effect of suspended particulates in Poyang Lake on the growth and flocculation of three kinds of algae[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(5): 1318-1324

鄱阳湖水体颗粒物对 3 种典型藻类的生长及絮凝作用

曹晶^{1,2}, 刘建辉¹, 储昭升^{1,*}, 王毅力³

1. 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

2. 天津科技大学生物工程学院, 天津 300457

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: 研究了鄱阳湖水体颗粒物对 3 种典型藻类的生长及絮凝作用。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, 利用 500 mL 玻璃锥形瓶作为小型、光照均一体系, 于此体系中研究了颗粒物对藻类生长的影响, 使用混悬试验搅拌仪分别研究了颗粒物粒径、浓度和体系 pH 对颗粒物絮凝沉降藻细胞的影响。在小型光照均一体系中, 20 mg·L⁻¹ (鄱阳湖悬浮颗粒物低浓度) 和 80 mg·L⁻¹ (鄱阳湖悬浮颗粒物高浓度) 颗粒物对 3 种藻类的生长影响均较小。在颗粒物投加量为 0.02 g·L⁻¹ 时, 60~300 目颗粒物均促进藻类的絮凝沉降, 并且随着颗粒物粒径(D_{50})的增大, 藻细胞的絮凝沉降效率逐渐减小, 而且粒径在 1~25 μm 部分的颗粒在此过程中占主导地位。当颗粒物投加量由 0.02 g·L⁻¹ 升至 1.28 g·L⁻¹ 时, 3 种藻的絮凝沉降效率随之提高。在颗粒物投加量为 0.02 g·L⁻¹ 时, 铜绿微囊藻、四尾栅藻和菱形藻的絮凝沉降效率仅为 11.08%、15.87% 和 7.50%, 当颗粒物浓度升至 1.28 g·L⁻¹ 时, 3 种藻的絮凝沉降效率分别达 42.33%、41.72%、28.98%。在 pH 值 6~10 范围内, 随着 pH 升高, 颗粒物对蓝藻、绿藻的絮凝沉降作用逐渐减小, 絮凝沉降效率分别从 pH 为 6 时的 36.10%、35.07% 降到 pH 为 10 时的 16.25%、12.59%; 而对硅藻的絮凝沉降作用不明显。由此可见, 鄱阳湖水体颗粒物影响藻类的絮凝沉降过程, 使藻类的群落结构发生变化。

关键词: 水体颗粒物; 藻类; 粒径; 浓度; pH; 絮凝沉降效率

文章编号: 0253-2468(2015)05-1318-07

中图分类号: X524

文献标识码: A

The effect of suspended particulates in Poyang Lake on the growth and flocculation of three kinds of algae

CAO Jing^{1,2}, LIU Jianhui¹, CHU Zhaosheng^{1,*}, WANG Yili³

1. 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

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

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: The effects of suspended particles in Poyang Lake on the growth and flocculation of three kinds of typical algae were studied. The algae, such as *Microcystis aeruginosa* (cyanobacteria), *Scenedesmus quadricauda* (green algae) and *Nitzschia* (diatoms), and sediments collected in Poyang Lake were used to conduct the experiments, which includes the effect of suspended particulates on the algae growth, and the effect of size, concentration and pH of the suspended matrix on the flocculation-sedimentation efficiency of algae cells. The tested concentrations of 20 mg·L⁻¹ (low in Poyang Lake) and 80 mg·L⁻¹ (high in Poyang Lake) of particles slightly influenced the growth of three kinds of algae cells. The jar test results show that 0.02 g·L⁻¹ particulates with the size of 60–300 meshes could enhance the flocculation-sedimentation efficiency, which gradually decreased with the increase of particulate size in terms of D_{50} . It can also be observed that the particulates size in 1~25 μm dominated the flocculation-settlement process. Moreover, the flocculation-sedimentation efficiency of these three kinds of algae increased as the dosage increased from 0.02 g·L⁻¹ to 1.28 g·L⁻¹. At the lower dosage, the removal efficiencies for *Microcystis aeruginosa*, *Scenedesmus quadricauda* and *Nitzschia* were only 11.08%, 15.87% and 7.5%; at the higher one, the removal efficiencies increased up to 42.33%, 41.72% and 28.98%, respectively. With the rise of pH from 6.0 to 10.0, the flocculation-settlement efficiency of cyanobacteria or green algae gradually decreased from 36.10% or 35.07% to 16.25% or 12.59%, while pH had little effect on diatoms. It can be seen that suspended particulates in Poyang Lake can influence the flocculation-settlement process of algae, which also caused the change of algae community structure.

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: chuzs@caes.org.cn

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

Keywords: suspended particles in waterbody; algae; particle size; concentration; pH; flocculation-sedimentation efficiency

1 引言 (Introduction)

水体颗粒物主要包括矿物质、粘土、有机颗粒物、生物残骸和包裹有机物的无机颗粒物 (Lu and Allen, 2006)。水体颗粒物影响藻类的生长。一般而言,水体颗粒物对藻类生长影响的 3 个途径分别为:影响光照、絮凝藻细胞和氮磷释放等 (Bilotta and Brazier, 2008)。已有研究表明,水体颗粒物的性质、浓度、尺寸和 zeta 电位等均会影响其对藻细胞的絮凝沉降效果,通过改变颗粒物表面性质:zeta 电位、化学键、有机质结构等,可以提高它们对藻细胞的絮凝沉降效果,从而降低蓝藻水华的发生风险 (Pan et al., 2006a; Pan et al., 2006b; Zou et al., 2006; Pan et al., 2011a; Pan et al., 2011b)。此外,水体颗粒物通过改变光照及氮磷释放等途径影响藻类生长过程 (龚玲等, 2006; 姜霞等, 2011; Hu et al., 2011)。

鄱阳湖接纳五河来水,流入长江,属于过水性湖泊,其中的颗粒物含量高且变化复杂 (马逸麟等, 2003),其对藻类的生长必然产生相应的影响。本研究中的水体颗粒物为鄱阳湖的沉积物,藻类为湖泊中典型的蓝藻 (铜绿微囊藻)、绿藻 (四尾栅藻) 和硅藻 (菱形藻),通过絮凝试验研究水体颗粒物对这些

藻类生长及絮凝的影响特征,分析水体颗粒物粒径、浓度、体系 pH 等因素对上述絮凝过程的影响,为鄱阳湖水华预测分析提供参考。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 实验材料

实验藻种为鄱阳湖含量较多的蓝藻——铜绿微囊藻 (*M. aeruginosa*)、绿藻——四尾栅藻 (*S. quadricauda*) 和硅藻——菱形藻 (*Nitzschia*),均分离于太湖。将藻种接在 10 L 的玻璃瓶中 (9 L 的培养基),在温度为 (26 ± 1) °C,光照强度为 2600 lx,光暗比为 12 h/12 h 的人工气候室中进行曝气培养直至对数生长期备用。

2.2 实验方法

2.2.1 颗粒物制备及粒径分析 水体颗粒物采集自鄱阳湖 (116°32'37"E, 29°09'55"N) 沉积物,冷藏运至实验室后冷冻 (-20 °C) 保存。样品经自然风干后研磨、分别过筛 60 目、100 目、200 目、230 目和 300 目,于聚乙烯袋中冷藏保存。絮凝实验开始前,采用去离子水将颗粒物配制成 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的悬浊液备用。颗粒物粒径使用激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000) 测定,结果见表 1。

表 1 颗粒物粒径分布

Table 1 Size distribution of suspended particulates

过筛目数/目	中值粒径 $D_{50}/\mu\text{m}$	颗粒物不同粒径所占百分比							
		1~5 μm	5~10 μm	10~15 μm	15~25 μm	25~50 μm	50~100 μm	100~200 μm	200~300 μm
300	10.720	19.42%	24.38%	18.36%	21.02%	13.14%	0.5%	0	0
230	12.472	16.79%	21.92%	16.50%	20.66%	16.92%	3.44%	0.77%	0.33%
200	14.321	15.48%	19.16%	14.45%	17.48%	12.96%	2.13%	0.27%	0
100	20.588	13.36%	13.84%	10.53%	16.07%	22.50%	13.55%	6.27%	0.71%
60	22.924	12.58%	12.96%	9.91%	14.64%	20.37%	13.90%	5.34%	1.16%

2.2.2 其它指标测定方法 悬浊液中初始总氮 (TN)、总磷 (TP) 采用过硫酸钾消解法和钼锑抗分光光度法测定,可溶性总氮 (DTN)、可溶性总磷 (DTP) 用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后测定 (国家环境保护总局, 2012)。颗粒物及藻类 zeta 电位使用 zeta 电位仪 (Malvern, Zeta Sizer 2000) 测定,测定结果见表 2、表 3。藻细胞密度采用血球计数板 (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。

表 2 悬浊液中氮磷浓度

Table 2 The content of nitrogen and phosphorus in the suspensions

mg·L ⁻¹			
TN	DTN	TP	DTP
0.62	0.45	0.05	0.017

表 3 颗粒物及藻类 zeta 电位

Table 3 Zeta potential (mV) 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

2.2.3 颗粒物对藻类生长影响实验 在含 200 mL 藻培养液的 500 mL 锥形瓶中接入 pH=8 条件下对数生长期的藻,藻细胞密度 $10^5 \text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$.然后分别将一定体积 2.2.1 节中的悬浊液加入上述的锥形瓶中,相应的颗粒物(300目)浓度分别为 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (鄱阳湖悬浮颗粒物浓度范围),并设置一个颗粒物浓度为 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的空白样品作为对照组,每组设置 2 个平行.将上述各锥形瓶置于温度 $(26\pm 1)^\circ\text{C}$,光照强度 2600 lx,光暗比 12 h/12 h 的人工气候室进行培养,每天人工振荡 6 次.从接种的第 1 天开始计数,每 2 d 取样 1 次,绘制藻生长曲线,观察藻类生长情况.

2.2.4 絮凝实验 采用混凝试验搅拌机进行颗粒物絮凝沉降藻类的试验,相应的实验程序如下:①颗粒物粒径对藻细胞絮凝沉降的影响:取 pH=8 条件下对数生长期的藻液 500 mL 至搅拌机 1 L 烧杯内,藻细胞数 $10^5 \text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$.搅拌开始后迅速将不同粒径颗粒物(60目、100目、200目、230目、300目)悬浊液分别加入藻液,颗粒物浓度 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.设置搅拌强度 $G=21 \text{ s}^{-1}$,搅拌时间 30 min,搅拌结束后迅速从取样口取样 100 mL 于量筒中静置,静置沉降时间 30 min 后,于液面下 2 cm 处取上清液在显微镜下计数,并计算絮凝沉降效率.②颗粒物浓度对藻细胞絮凝沉降的影响:搅拌开始后迅速将混匀后的颗粒物(300目)悬浊液加入烧杯中,藻液相应颗粒物浓度分别为 0、0.02、0.08、0.16、0.32、0.64、1.28 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其他操作与第一阶段相同.③悬浊液 pH 对颗粒物絮凝沉降藻细胞的影响:将藻液 pH 分别调至 6、7、8、9、10,搅拌开始后迅速将混匀后的 300 目颗粒物悬浊液加入烧杯中开始实验,颗粒物浓度 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其他操作与第一阶段相同.

用絮凝沉降效率反映颗粒物对藻类絮凝沉降效果,计算公式如下:

$$\text{FSE} = \left(\frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \right) - \left(\frac{C'_1 - C'_2}{C'_1} \times 100\% \right) \quad (1)$$

式中, 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 ($\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$).

3 结果 (Results)

3.1 颗粒物不同浓度对藻类生长的影响

对鄱阳湖全湖布点,于各点位取样测定鄱阳湖

悬浮颗粒物浓度(SS),测定结果如图 1 所示.结果显示,鄱阳湖 SS 范围 $15.7\sim 153.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均颗粒物浓度 $58.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.因此本实验选取 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 作为鄱阳湖低颗粒物浓度和高颗粒物浓度.

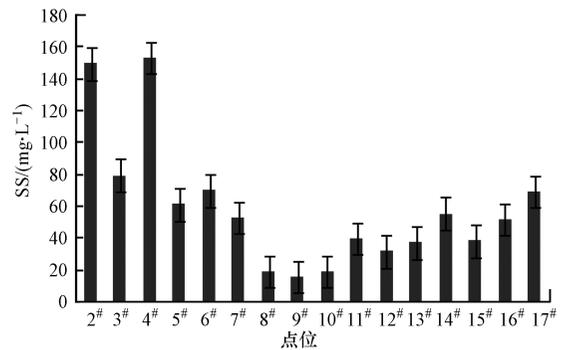
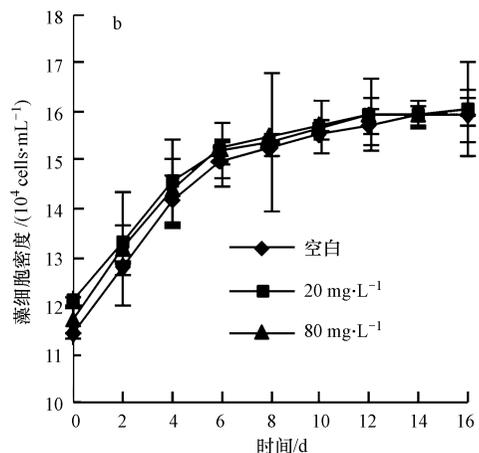
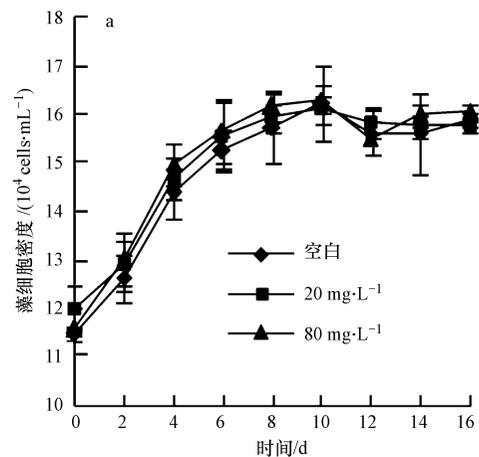


图 1 鄱阳湖悬浮颗粒物浓度

Fig.1 Concentrations of suspended particulates in Poyang Lake

图 2 为鄱阳湖低浓度和高浓度颗粒物对藻类生长的影响曲线.可见,2 种浓度颗粒物对 3 种藻类的生长影响较小.在 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 颗粒物浓度作用下,铜绿微囊藻和四尾栅藻的生长曲线与空白对照样品差别不大(图 2a、b),菱形藻的生长受到



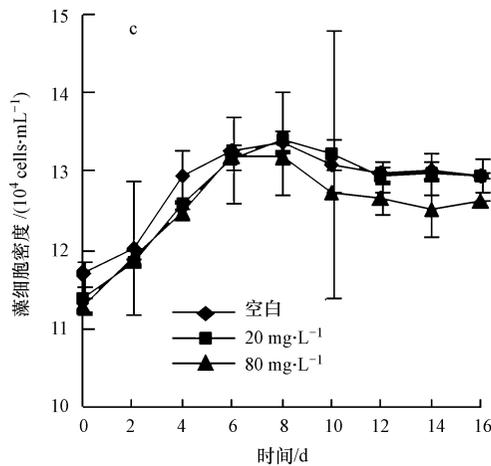


图 2 两种浓度颗粒物影响下藻类的生长曲线 (a. 铜绿微囊藻, b. 四尾栅藻, c. 菱形藻)

Fig.2 Growth curve of algae in different particulates contents (a. *M. aeruginosa*, b. *S. quadricauda*, c. *Nitzschia*)

一定的抑制,且 80 mg·L⁻¹ 颗粒物时,菱形藻的生长提前进入衰亡期(图 2c)。

3.2 不同粒径颗粒物对藻细胞絮凝沉降的影响

3 种藻细胞静置沉降后的藻细胞密度均小于初始值,并且与对照组相比,藻细胞密度变化均较大(图 3),说明不同粒径颗粒物均促进藻类的絮凝沉降.随着颗粒物目数的减小,即颗粒物粒径的增加(表 1),3 种藻细胞的絮凝沉降效率逐渐减小(图 4).相对于空白对照组,铜绿微囊藻和四尾栅藻的藻细胞密度变化较大,而菱形藻细胞密度变化则较小.从图 4 也可看出,铜绿微囊藻的絮凝沉降效率最大,四尾栅藻次之,菱形藻最小.当颗粒物过 300 目 ($D_{50} = 10.72 \mu\text{m}$) 时,3 种藻类的絮凝沉降效率分别为 26.85%、21.54% 和 20.50%,而当颗粒物过 60 目 ($D_{50} = 22.924 \mu\text{m}$) 时,对应的絮凝沉降效率分别降为 10.57%、8.20% 和 5.65%.说明颗粒物粒径越小,藻类的絮凝沉降效率越大。

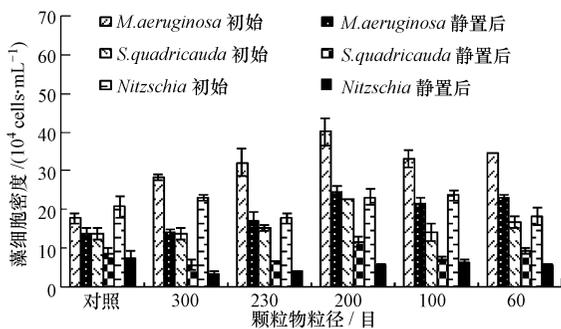


图 3 不同粒径颗粒物作用下的藻细胞密度变化

Fig.3 Changes in algal cell density with the particulate size in suspension

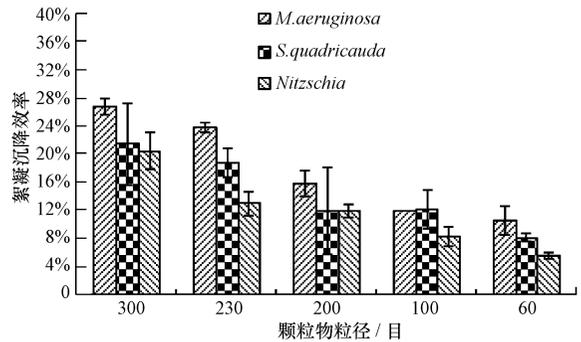
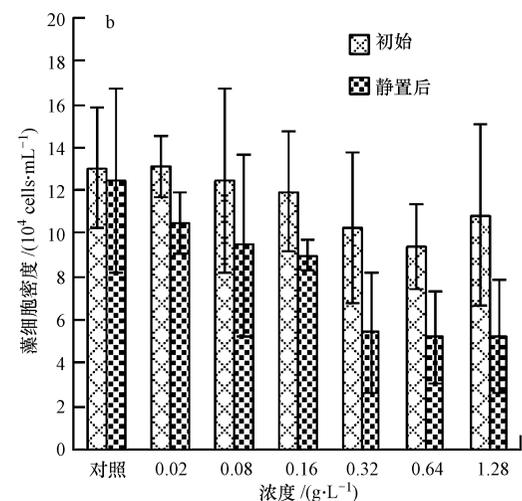
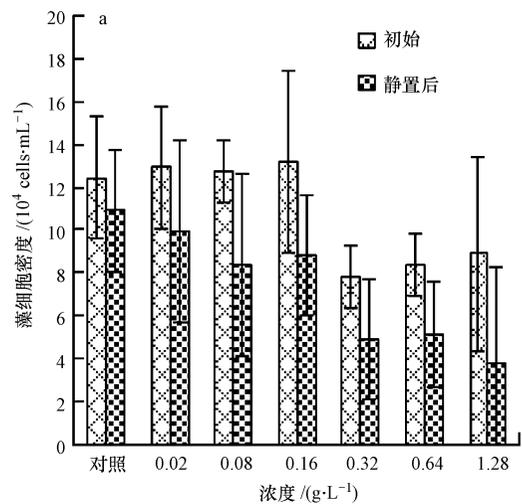


图 4 不同粒径颗粒物对藻类的絮凝沉降效率的影响

Fig.4 Effect of particulate size in suspension on the flocculating efficiency of algae

3.3 颗粒物浓度对藻类絮凝沉降性能的影响

不同浓度颗粒物作用下,3 种藻细胞静置沉降后的藻细胞密度均小于初始值(图 5),并且与空白对照组相比,3 种藻细胞密度变化均较大,说明不同浓度颗粒物均促进藻类沉降.在 0.02 ~ 1.28 g·L⁻¹ 浓度范围内,3 种藻的絮凝沉降效率随着颗粒物浓度



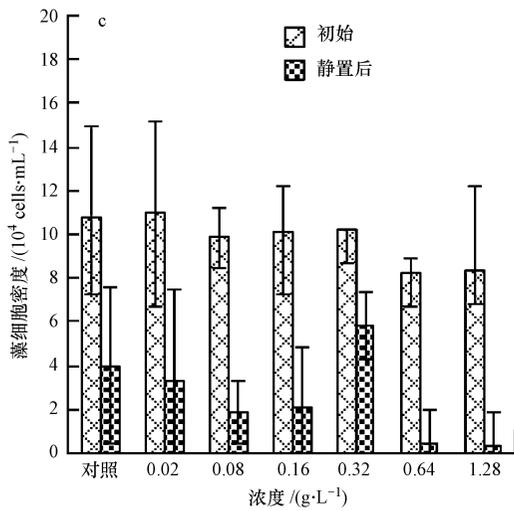


图5 不同浓度悬浊液下藻细胞密度变化 (a. 铜绿微囊藻, b. 四尾栅藻, c. 菱形藻)

Fig.5 The algal cell density change under different concentration of suspension (a. *M. aeruginosa*, b. *S. quadricauda*, c. *Nitzschia*)

的增加呈增大趋势(图6)。铜绿微囊藻和四尾栅藻的藻细胞沉降速度较慢,而菱形藻细胞沉降速度较快,但菱形藻的絮凝沉降效率却偏小,说明菱形藻细胞以自身沉降为主。在颗粒物浓度为0.02 g·L⁻¹时絮凝沉降30 min后,铜绿微囊藻、四尾栅藻和菱形藻的絮凝沉降效率仅为11.08%、15.87%和7.50%。颗粒物浓度升至0.32 g·L⁻¹时,3种藻的絮凝沉降效率为22.31%、37.15%、27.24%。而当颗粒物浓度升至1.28 g·L⁻¹时,3种藻的絮凝沉降效率分别达42.33%、41.72%、28.98%。

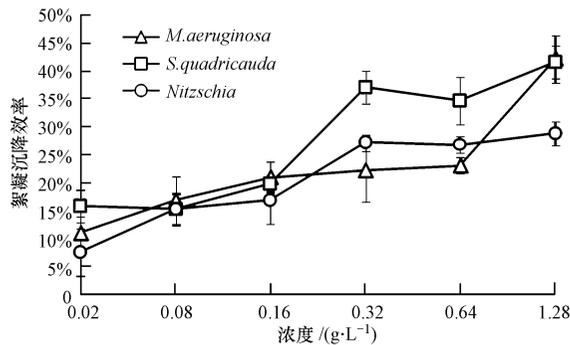


图6 不同浓度悬浊液对藻类的絮凝沉降效率

Fig.6 Flocculating efficiency of algae under different concentrations of suspension

3.4 悬浊体系 pH 对藻类絮凝沉降性能的影响

不同 pH 悬浊液对藻类絮凝沉降的影响效果见图7。随着 pH 值的增大,铜绿微囊藻和四尾栅藻的

絮凝沉降效率均逐渐变差,菱形藻则趋于稳定。pH 值从6增加到7时,3种藻的絮凝沉降效率变化不明显,pH 值从7增加到10时,铜绿微囊藻和四尾栅藻的絮凝沉降效率急剧减小,菱形藻的絮凝沉降效率始终变化不大。pH 值为6时,铜绿微囊藻、四尾栅藻和菱形藻的絮凝沉降效率分别为36.10%、35.07%和17.80%,pH 值升至10时,3种藻的絮凝沉降效率分别下降为16.25%、12.59%和10.31%。由此可见,颗粒物在微酸性条件下絮凝沉降铜绿微囊藻和四尾栅藻效果较好,在 pH 6~9 范围内对菱形藻的絮凝沉降效果影响较小。

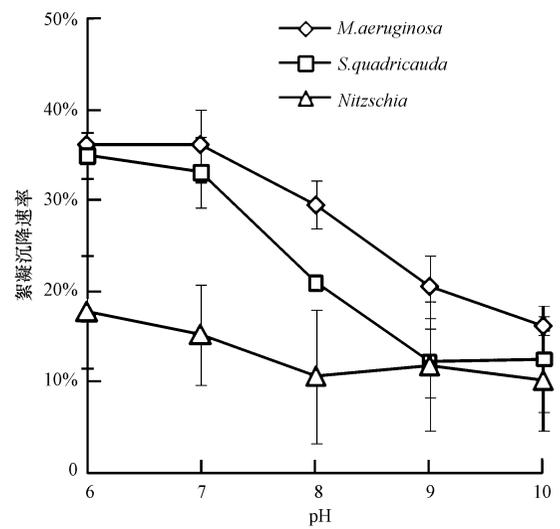


图7 不同 pH 悬浊液对藻类的絮凝沉降效率

Fig.7 Flocculating efficiency of algae under different pH of suspension

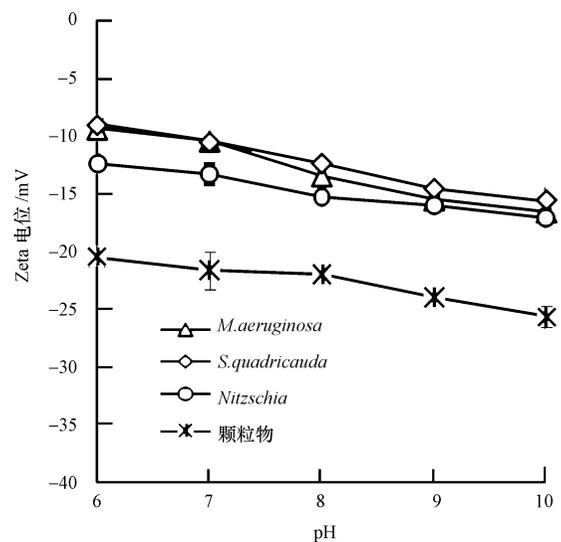


图8 不同 pH 下藻类及颗粒物的 zeta 电位

Fig.8 Zeta potential of algal and the particles under different pH

4 讨论 (Discussion)

实验中, $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的颗粒物对 3 种藻类的生长影响并不大. 由于培养液中的氮磷含量充足(表 2), 且实验在 500 mL 锥形瓶中进行, 锥形瓶为透光玻璃瓶, 虽然体系中有颗粒物, 但此体系为光照均一体系, 因此低浓度颗粒物在此体系中对光照的阻碍作用并不大, 对藻类光合作用影响也不大, 对 3 种藻类生长影响很小. 对鄱阳湖半年的野外实地监测显示, 悬浮颗粒物浓度范围 $15.7 \sim 153.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 1), 说明实际湖体中, 此颗粒物浓度范围通过光照对藻类生长的影响较小, 颗粒物可能通过对藻细胞的絮凝沉降作用影响鄱阳湖藻类的生长.

藻细胞表面性质、藻细胞大小、体积以及颗粒物性质、大小、浓度等均会影响颗粒物与藻细胞的絮凝效果. 藻细胞表面会大量分泌胞外多糖 (Extracellular polysaccharides, EPS), 胞外多糖是一种粘性物质, 具有固沙及粘附作用 (Robins *et al.*, 1986; 鲍康德等, 2005; 任欣欣等, 2013). Fattom 和 Bar-Or 等 (Fattom and Shilo, 1984; Bar-Or and Shilo, 1987) 指出, 藻细胞由于表面胞外多糖的疏水性能依附于沉积物表面, 与水体中的悬浮颗粒物结合发生共沉淀. 本研究中颗粒物对 3 种藻细胞的絮凝沉降作用不同, 可能与藻细胞表面胞外多糖的分泌量有关. 不同目数筛分后的颗粒物粒径分布不同(见表 1), 中值粒径 D_{50} 越大, 粒径在 $1 \sim 25 \mu\text{m}$ 部分的颗粒数目越小. 而随着颗粒物粒径的增加, 3 种藻的絮凝沉降效率降低, 可见 $1 \sim 25 \mu\text{m}$ 颗粒物对藻类的絮凝沉降作用较强. 李富根也指出, 一般情况下, 对同一类颗粒物而言, 其粒径越小, 比表面积和表面能越大, 因而更易与藻细胞发生粘附絮凝作用 (李富根, 2005).

颗粒物浓度的增加, 有利于藻类的絮凝沉降. 单位体积中颗粒物数目的提高, 会使小粒径颗粒物数量增多, 颗粒物与藻细胞之间发生碰撞的几率增加, 还会使藻细胞粘附颗粒物数量增多, 从而提高絮凝沉降效率. 鄱阳湖是一个过水型湖泊, 4 月起, 五河进入汛期, 流入鄱阳湖颗粒物骤增. 7~9 月长江大汛期间, 入湖颗粒物大部分淤于湖内. 10 月以后, 湖水随长江洪水退落而泄量增加, 颗粒物出湖量大于入湖量 (马逸麟等, 2003). 三峡工程建成后, 随着下泄流量增加, 鄱阳湖提前涨水, 流速增加, 入湖颗粒物含量增加 (王云飞, 1994). 因此鄱阳湖悬浮颗粒

物含量较高且随湖流变化复杂, 促进藻类的絮凝沉降, 从而改变着水华发生风险. 湖体流速较大的区域, 水量交换快, 影响蓝绿藻聚集, 不易形成水华 (颜润润等, 2008). 鄱阳湖至今未暴发水华可能与悬浮颗粒物浓度较高及流速较大有关.

如图 8 所示, pH 增加导致藻类与颗粒物的 zeta 电位降低, 使得越来越多的 OH^- 吸附到藻细胞及颗粒物表面, 使二者的负电荷逐渐变大, 排斥力也逐渐增大, 降低了颗粒物与藻细胞的絮凝沉降效果, 因此铜绿微囊藻和四尾栅藻的絮凝沉降效率逐渐变差. 菱形藻的絮凝沉降效率随着 pH 值的升高变化程度较小, 这可能是因为菱形藻在生长过程中会形成絮团, 主要以自身沉降为主. 夏秋是水华的高发季节, 蓝藻适宜在偏碱性的水体中生长, 绿藻具有较强的耐酸耐碱性, 对 pH 适宜范围较广, 硅藻适宜偏中性的水体 (杨波等, 2007). pH 增大, 水体呈碱性, 适合铜绿微囊藻和四尾栅藻生长. 而在碱性条件下, 颗粒物对藻类的絮凝沉降作用降低, 有利于藻类大量繁殖形成水华, 所以在颗粒物作用下, 保持鄱阳湖水体在中性或微酸性环境下不易暴发水华.

5 结论 (Conclusions)

1) 在小型光照均一体系中, 鄱阳湖颗粒物浓度对藻类的生长影响较小.

2) 悬浮颗粒物对藻类絮凝沉降效果不同, 蓝藻、绿藻的絮凝沉降效果优于硅藻. 悬浮颗粒物粒径、颗粒物浓度, 体系 pH 均影响悬浮颗粒物对藻类的絮凝沉降. 在速度梯度为 20 s^{-1} , 搅拌时间为 30 min 时, $60 \sim 300$ 目粒径范围内, 颗粒物粒径越小, 3 种藻的絮凝沉降作用越显著. $0.02 \sim 1.28 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内, 浓度越大, 3 种藻的絮凝沉降效果越明显. pH 6~10 范围内, pH 越大, 蓝藻、绿藻的絮凝沉降效率越大, 硅藻的絮凝沉降效率无显著变化.

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):

- 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
- Bar-Or Y, Shilo M. 1987. Characterization of macromolecular flocculants produced by *Phormidium* sp. strain J-1 and by *Anabaenopsis circularis* PCC 6720 [J]. Applied and Environmental Microbiology, 53(9): 2226-2230

- Bilotta G S, Brazier R E. 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota[J]. *Water Research*, 42(12): 2849-2861
- Fattom A, Shilo M. 1984. Hydrophobicity as an adhesion mechanism of benthic cyanobacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 47(1): 135-143
- 龚玲, 钟成华, 邓春光. 2006. 水体中悬浮泥沙对藻类生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 25(增刊): 687-689
- 国家环境保护总局. 2012. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社. 12
- Hu K M, Pang Y, Wang H, *et al.* 2011. Simulation study on water quality based on sediment release flume experiment in lake Taihu, China[J]. *Ecological Engineering*, 37(4): 607-615
- 姜霞, 王秋娟, 王书航, 等. 2011. 太湖沉积物氮磷吸附/解吸特征分析[J]. *环境科学*, 32(5): 1285-1291
- 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
- Lu Y F, Allen H E. 2006. A predictive model for copper partitioning to suspended particulate matter in river waters [J]. *Environmental Pollution*, 143(1): 60-72
- Matsuoka Y, Goda T, Naito M. 1986. An eutrophication model of Lake Kasumigaura [J]. *Ecological Modelling*, 31(1/4): 201-219
- 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
- Pan G, Zhang M M, Chen H, *et al.* 2006a. Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils. I. Equilibrium and kinetic screening on the flocculation of *Microcystis aeruginosa* using commercially available clays and minerals [J]. *Environmental Pollution*, 141(2): 195-200
- Pan G, Zou H, Chen H, *et al.* 2006b. Removal of harmful cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils. III. Factors affecting the removal efficiency and an in situ field experiment using chitosan-modified local soils[J]. *Environmental Pollution*, 141(2): 206-212
- 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
- 任欣欣, 姜昊, 冷欣, 等. 2013. 蓝藻胞外多糖的生态学意义及其工业应用[J]. *生态学杂志*, 32(3): 762-771
- 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
- 王云飞. 1994. 三峡工程对鄱阳湖冲淤的影响和预测[J]. *湖泊科学*, 6(2): 124-130
- 颜润润, 逢勇, 赵伟, 等. 2008. 环流型水域水力对藻类生长的影响[J]. *中国环境科学*, 28(9): 813-817
- 杨波, 储昭升, 金相灿, 等. 2007. CO₂/pH对三种藻生长及光合作用的影响[J]. *中国环境科学*, 27(1): 54-57
- Zou H, Pan G, Chen H, *et al.* 2006. Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils. II. Effective removal of *Microcystis aeruginosa* using local soils and sediments modified by chitosan[J]. *Environmental Pollution*, 141(2): 201-205