

# Growth Inhibitory Mechanism of Quercetin on the *Anabena flos-aquae*

Shengling Xu, Fenfen Song, Fantai Jia\*

The First Middle School of Tengzhou in Shandong Province, Tengzhou Shandong  
Email: zimuyouxiang4563@sohu.com, wangyiyouxiang1359@163.com

Received: May 25<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jun. 8<sup>th</sup>, 2018; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

In this paper, flavonoid quercetin was selected as the algal-inhibiting ingredient, and quercetin and chitosan were combined to form quercetin-chitosan algaecide beads. The effects of different doses of quercetin-chitosan algaecide beads on the growth of *Anabena flos-aquae* were studied. The mechanism of quercetin inhibition was analyzed. The study showed that the chlorophyll a content in the 50 mg/L dose group was reduced to 83% of 0 h after adding the quercetin-chitosan alginicide beads cultured in the algae for 96 h. The activity of superoxide dismutase was reduced by 51% compared with 0 h; the content of malondialdehyde increased by 54% at 36 h compared with 0 h. After 96 hours of culture, the three chlorophyll fluorescence parameters Fv/Fm, Yield, ETRmax in the 50 mg/L dose group were reduced by 83%, 85%, and 78%, respectively, compared to 0 h. The content of phycocyanin and allophycocyanin showed an increasing trend with the increase of algal culture time. The quercetin-chitosan algaecide pellets will cause great oxidative damage to *Anabena flos-aquae*. The inhibition mechanism is to inhibit the synthesis of chlorophyll a, disturb the phycobiliprotein content, and destroy the PS II reaction center. The electron transfer of photosynthesis reduces the photosynthetic efficiency of *Anabena flos-aquae* and inhibits normal growth and reproduction.

## Keywords

Quercetin, Photosynthesis, Inhibition Mechanism

---

# 槲皮素对水华鱼腥藻的生长抑制机理研究

徐圣琳, 宋芬芬, 贾凡太\*

山东省滕州市第一中学, 山东 滕州  
Email: zimuyouxiang4563@sohu.com, wangyiyouxiang1359@163.com

收稿日期: 2018年5月25日; 录用日期: 2018年6月8日; 发布日期: 2018年6月15日

\*通讯作者。

## 摘要

本文选用黄酮类化合物槲皮素作为抑藻成分,将槲皮素与壳聚糖结合制作成槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球。以水华鱼腥藻作为试验对象,研究不同剂量的槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球对水华鱼腥藻的生长影响,并分析槲皮素抑藻的机理。研究表明,水华鱼腥藻藻液中加入槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球培养96 h后,50 mg/L剂量组中的叶绿素a含量降低为0 h的83%;超氧化物歧化酶SOD活性比0h降低了51%;丙二醛MDA含量在36 h比0 h增加了54%。培养96 h后,三种叶绿素荧光参数Fv/Fm、Yield、ETRmax在50 mg/L剂量组,比0 h分别降低了83%、85%、78%。藻蓝蛋白和别藻蓝蛋白含量PC含量随着抑藻剂小球培养时间的增加,呈现递增趋势。槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球会对水华鱼腥藻造成极大的氧化损伤,其抑制机理是通过抑制叶绿素a的合成,扰乱藻胆蛋白含量,破坏PS II反应中心,阻止光合作用的电子传递,使水华鱼腥藻光合作用效率降低,抑制了正常生长繁殖。

## 关键词

槲皮素, 光合作用, 抑藻机理

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 前言

在大家日益关注的环境问题中,水体富营养化是最严峻的污染问题之一。人类活动导致了过量的氮、磷等营养元素进入水体,引起蓝藻水华的爆发[1]。蓝藻水华爆发的优势藻种中能产生毒素的主要有微囊藻属(*Microcystis*)、鱼腥藻属(*Anabaena*)等[2]。据不完全统计,有害蓝藻水华爆发事件发生率逐年升高,且发生的范围、持续时间、产毒藻种等都呈上升趋势,渔业生产受到影响,水体生态系统受到破坏,饮用水质量下降,人类健康安全受到威胁[3]。

科学家发现植物化感物质能有效抑制蓝藻水华,因此利用化感作用的抑藻技术已成为治理水华的研究热点。化感物质是植物释放的次生代谢物质,化感作用是指化感物质能影响其他植物的生长[4]。化感物质能有效抑制藻类生长的作用机理有一般被认为有3种途径:影响藻类的光合作用、破坏藻类的细胞膜、影响藻细胞的酶活性[5]。

光合作用属于蓝藻生长繁殖最基础的过程之一。有研究表明,粉绿狐尾藻能释放出降低叶绿素a和藻胆蛋白各组分含量的化感物质,进而有效的抑制铜绿微囊藻的生长[6]。三种乔木落叶的水浸出液能降低微囊藻细胞中叶绿素a和光合作用主要荧光参数Fv/Fm、Yield、ETRmax,抑制微囊藻的生长[7]。叶绿素a和藻胆蛋白起着光能的吸收、传递和转化功能,荧光参数Fv/Fm、Yield、ETRmax表示光合作用中电子传递效率,化感物质抑制了叶绿素a和藻胆蛋白的合成,抑制藻的荧光参数,导致电子传递链中断,光合作用速率受到抑制,光合产物减少,抑制藻类的生产繁殖[8]。

酶在生物体内起着至关重要的作用,能影响生物的正常生理过程。研究人员发现,菖蒲会增加铜绿微囊藻的超氧化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶的活性,造成脂质过氧化作用,使藻细胞加速衰老[9]。化感物质通过激发或抑制藻类体内酶的活性,使藻类生理功能紊乱,达到化感作用抑藻效应[10]。

近年来不少研究表明,植物天然产物黄酮类化合物具有显著抑藻作用[11]。本研究选用黄酮类化合物

槲皮素作为抑藻成分，将槲皮素与壳聚糖结合制作成槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球。将水华鱼腥藻作为试验对象，研究不同剂量的槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球对水华鱼腥藻的生长影响，并分析槲皮素抑藻的机理。希望能研究出抑藻效果好、安全性高的抑藻剂，为研发抑藻剂技术提供参考依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验藻种

试验藻种选用水华鱼腥藻(*Anabena flos-aquae*)，藻种购自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库。

### 2.2. 藻种培养

本试验藻种采用 BG11 培养基培养[12]，配方见表 1。在 500 ml 锥形瓶中加入 100 ml 培养基，然后接入水华鱼腥藻藻种，摇匀培养。将水华鱼腥藻在培养箱中培养 4~5 d 后，即可长到对数增长期，用于试验。

培养条件：温度(25 ± 1)℃，光照 4000 lx，光暗比 12 h:12 h，藻液每天摇动 3~5 次。

### 2.3. 抑藻剂小球的制备

槲皮素(querctin, 纯度 > 99%)购自中国药品生物制品检定所，壳聚糖(脱乙酰度 > 80%)购自国药集团化学试剂有限公司。

文本参考发明专利制作抑藻剂小球[13]。取 10.0 g 壳聚糖和 6.5 g 槲皮素溶于 200 mL 水中。溶液在 25℃ 的条件下 200 r/min 恒温振荡 60 min。溶液振荡后用慢速滤纸过滤，得到的沉淀物在 25℃ 下真空干燥 24 h。即可得到槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球。

### 2.4. 抑藻实验

取 500 mL 三角瓶，洗净消毒烘干，每个瓶中加入 250 mL 水华鱼腥藻的藻液，藻液初始细胞密度约为  $10^6$  cells·L<sup>-1</sup>。在每个瓶中分别加入 1、5、10、25、50 mg/L 的槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球，记为 0 h，分别在培养 0、6、12、24、36、48、96 h 后，检测水华鱼腥藻的各项指标。每组 3 个平行样，培养条件同 2.2 所述。

### 2.5. 叶绿素 a 测定(热乙醇法)

试验采用热乙醇法进行叶绿素 a 测定[14]。

将 50 ml 水华鱼腥藻藻液过滤，滤膜放入 5 ml 的离心管中，-20℃ 下放置 24 h。

**Table 1.** The composition of BG11 medium

**表 1.** BG11 培养基成分

化学成分	浓度(mg·L <sup>-1</sup> )	化学成分	浓度(mg·L <sup>-1</sup> )
NaNO <sub>3</sub>	1500	Na <sub>2</sub> EDTA	1
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O	40	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.86
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	75	MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1.81
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	36	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.22
柠檬酸	6	CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.079
柠檬酸亚铁铵	6	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.39
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	20	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.049

取一定量的 90%乙醇放在烧杯中, 在 80℃~85℃水浴锅中预热。在滤膜的离心管中分别加入 4 ml 热乙醇, 80℃~85℃下水浴 2 min。离心管放置在避光室温下, 进行 6 h 萃取。萃取液用 25 mm 的玻璃纤维滤膜进行过滤, 然后用 90%乙醇将萃取液定容至 10 mL。

参比液为 90%乙醇, 用分光光度计对萃取液进行比色。样品分别在波长 665 nm 和 750 nm 处测消光率, 得到 E665 和 E750。比色皿中直接加入 1 滴 1 mol/L 的盐酸, 加盖摇匀, 酸化 1 min 后分别在波长 665 nm 和 750 nm 处测消光率, 得到 A665 和 A750。

将数据带入公式中, 计算叶绿素 a 浓度。

$$\text{Chl a} = 27.9V_{\text{乙醇}} \left[ (E665 - E750) - (A665 - A750) \right] / V_{\text{样品}}$$

其中, Chl a 为叶绿素 a 的浓度, mg/L;  $V_{\text{乙醇}}$  为萃取液定容时用的乙醇的体积, ml;  $V_{\text{样品}}$  是初始藻液未进行过滤时的体积, L。

## 2.6. 藻细胞 MDA 含量

丙二醛(malondialdehyde, MDA)检测试剂盒购买自南京建成生物工程研究所, 测试方法按试剂盒说明书操作。

## 2.7. 藻胆蛋白测定

水华鱼腥藻的藻胆蛋白包括藻红蛋白(PE)、藻蓝蛋白(PC)和别藻蓝蛋白(APC)。根据参考文献对其进行测定[15]。

取 3 mL 水华鱼腥藻藻样, 在 10,000 rpm 下离心 5 min, 离心后弃上清液, 加入 3 ml PBS (0.05 M, pH6.8) 打散混匀。样品存放在液氮中, 8 h 后拿出, 放置在避光室温下溶解, 如此反复冻溶 4 次。然后将样品在 10,000 rpm 下离心 5 min, 取上清液, 分别测定波长 620 nm、650 nm 和 565 nm 下的光吸收值。根据公式计算藻胆蛋白的含量:

$$\text{PC}(\text{mg/ml}) = (\text{OD}_{620} - 0.7 \times \text{OD}_{650}) / 7.38$$

$$\text{AP}(\text{mg/ml}) = (\text{OD}_{650} - 0.19\text{OD}_{620}) / 5.65$$

$$\text{PE}(\text{mg/ml}) = [\text{OD}_{565} - 2.8(\text{PC}) - 1.34(\text{AP})] / 1.27$$

## 2.8. 藻细胞抗氧化酶 SOD 活性测定

超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)检测试剂盒购买自南京建成生物工程研究所, 测试方法按试剂盒说明书操作。

## 2.9. 藻类叶绿素荧光参数测定

试验选用叶绿素荧光仪(PHYTO-PAM, Walz, Germany)对水华鱼腥藻的叶绿素荧光参数测定。将 2 mL 水华鱼腥藻藻液避光 5 min 后, 叶绿素荧光仪检测最小荧光 F0 和最大荧光 Fm, 得到可变荧光 Fv (即 Fm-F0), 计算可以得到光系统 II 的最大光化学量子产量 Fv/Fm。用仪器的饱和脉冲测定水华鱼腥藻的实际光化学量子产量 Yield。仪器间隔性逐渐增大光化光, 检测记录光量子产量, 通过快速光响应曲线, 得到最大电子传递速率 ETRmax。

## 2.10. 数据统计分析

试验样品设置 3 组平行样, 3 次重复实验结果均以平均值 ± 标准偏差表示, 数据统计学分析采用

SPSS (V18)软件进行, 绘图处理运用 Microsoft Excel2007 软件进行。

### 3. 结果

#### 3.1. 槲皮素对叶绿素 a 含量影响

水华鱼腥藻藻液中加入槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球培养, 叶绿素 a 含量的变化如图 1 所示。培养 96 h 后, 叶绿素 a 含量与 0 h 相比, 均有显著下降( $p < 0.01$ ); 1 mg/L 剂量组的叶绿素 a 含量降低为 0 h 的 58%; 50 mg/L 剂量组的叶绿素 a 含量降低为 0 h 的 83%。水华鱼腥藻的叶绿素 a 含量随着槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球的加入量和培养时间呈现出时间-剂量效应变化。

#### 3.2. 槲皮素对藻胆蛋白含量影响

水华鱼腥藻的藻胆蛋白包括藻红蛋白(PE)、藻蓝蛋白(PC)和别藻蓝蛋白(APC), 他们是藻类的光合系统 II (PS II)中重要捕光功能团, 能把吸收的能量传递给叶绿素 a [16]。图 2~4 中表示的为水华鱼腥藻经槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球培养后, 不同培养时间和不同剂量组中藻胆蛋白含量的变化。

由图 2 可以看出, 1 mg/L 剂量组在开始时, PE 的含量有稍微的起伏趋势, 在 12 h 时, PE 的含量比 0h 增加了 1%, 随后又降低呈平稳趋势。其他剂量组中的 PE 含量并没有随着培养时间的增加发生明显变化。

图 3 中, PC 含量的变化趋势非常明显。在 96 h 时, 1、5、10、25、50 mg/L 剂量组, PC 含量比 0 h 分别增加了 35% ( $p < 0.01$ )、30% ( $p < 0.01$ )、25% ( $p < 0.5$ )、23% ( $p < 0.5$ )、17% ( $p < 0.5$ )。说明水华鱼腥藻的 PC 含量随着抑藻剂小球培养时间的增加, 呈现递增趋势; 但是其增长的趋势随着剂量的增高而降低。

图 4 表示的 APC 含量变化, 随着培养时间的延长和抑藻剂小球剂量的增加呈现了增长趋势。经槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球培养后, 水华鱼腥藻的 APC 含量在 96 h 时 1、5、10、25、50 mg/L 剂量组比 0 h 分别增加了 18% ( $p < 0.01$ )、15% ( $p < 0.01$ )、12% ( $p < 0.01$ )、10% ( $p < 0.01$ )、8% ( $p < 0.01$ )。在 96 h 时, 1 mg/L 剂量组的 APC 含量比 50 mg/L 剂量组高出 8%。数据表明水华鱼腥藻的 APC 含量在抑藻剂小球的影响下, 随着剂量的增加和培养时间的延长而增加, 且低剂量组中的增长量高于高剂量组。

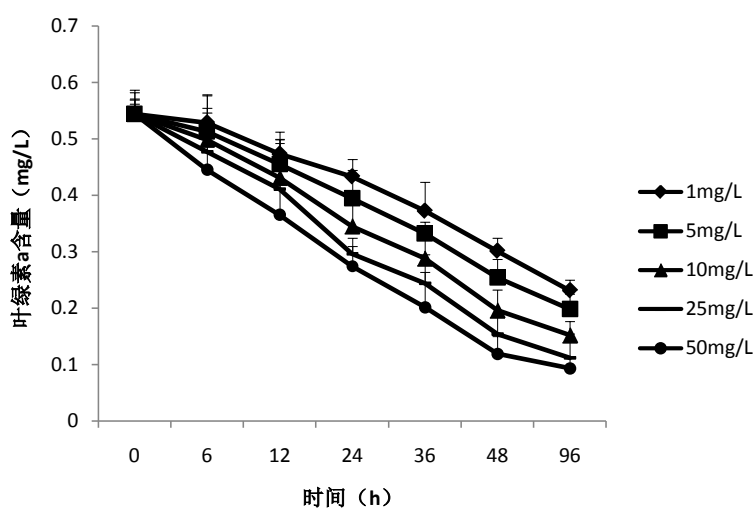
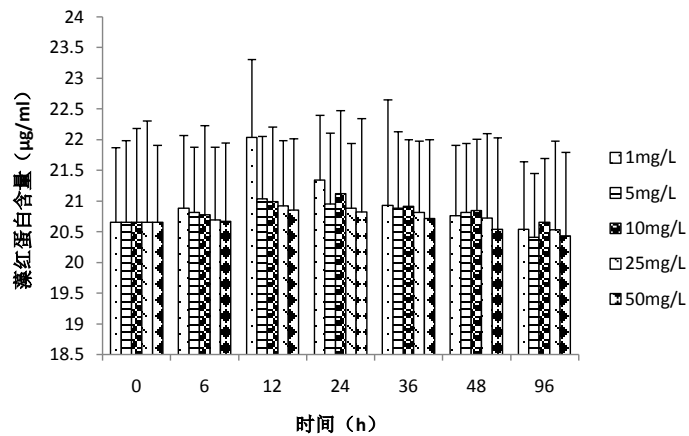


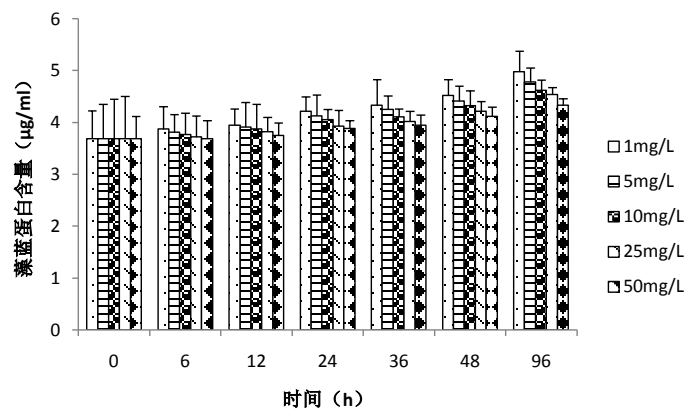
Figure 1. Effect of alginicide beads on chlorophyll a content in *Anabena flos-aquae*

图 1. 抑藻剂小球对水华鱼腥藻叶绿素 a 含量的影响



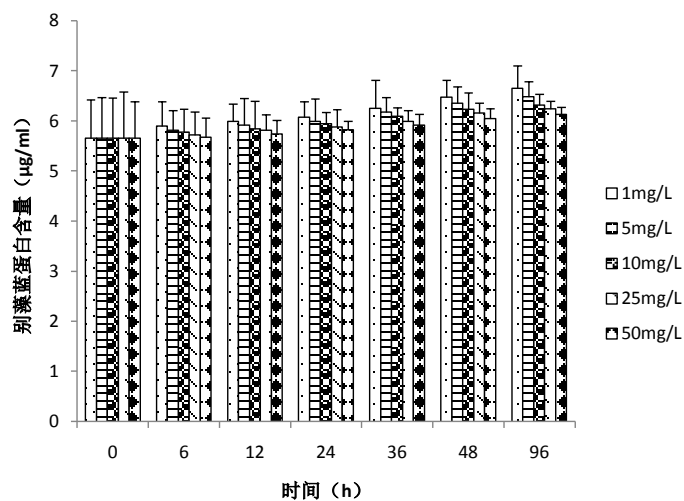
**Figure 2.** Effect of alginate beads on phycoerythrin content in *Anabena flos-aquae*

**图 2.** 抑藻剂小球对水华鱼腥藻藻红蛋白含量的影响



**Figure 3.** Effect of alginate beads on phycocyanin content in *Anabena flos-aquae*

**图 3.** 抑藻剂小球对水华鱼腥藻藻蓝蛋白含量的影响



**Figure 4.** Effect of alginate beads on allophycocyanin content in *Anabena flos-aquae*

**图 4.** 抑藻剂小球对水华鱼腥藻别藻蓝蛋白含量的影响

### 3.3. 槲皮素对抗氧化酶 SOD 活性影响

超氧化物歧化酶 SOD 是重要的抗氧化酶。图 5 所示的是水华鱼腥藻经槲皮素 - 壳聚糖抑藻剂小球培养后, 各剂量组内 SOD 活性的变化。

由图可见, SOD 活性随着时间的延长出现先增强后减弱的趋势, 最后低于正常水平。在低剂量组 1 mg/L 和 5 mg/L, SOD 活性在 24 h 前呈上升趋势, 24 h 时比 0 h 增长了 21% ( $P < 0.5$ )和 36% ( $P < 0.5$ ); 随后出现下降趋势, 在 96 h 时比 24 h 降低了 48% ( $P < 0.01$ )和 43% ( $P < 0.01$ ), 比 0 h 降低了 34% ( $P < 0.01$ )和 18% ( $P < 0.01$ )。10 mg/L 剂量组中, SOD 活性在 36 h 时比 0 h 增长了 68% ( $P < 0.01$ ), 在 96 h 降低到 0 h 水平。高剂量组 25 mg/L 和 50 mg/L, SOD 活性在 12 h 时比 0 h 增加了 39% ( $P < 0.01$ )和 53% ( $P < 0.01$ ), 在 96 h 时比 0 h 降低了 28% ( $P < 0.5$ )和 51% ( $P < 0.01$ )。

### 3.4. 槲皮素对 MDA 含量影响

丙二醛 MDA 含量是判断膜脂过氧化作用强弱的重要指标。不同剂量的槲皮素 - 壳聚糖抑藻剂小球处理水华鱼腥藻后, MDA 含量变化如图 6 所示。

图中显示, 1 mg/L 剂量组中, MDA 含量一直呈上升趋势, 96 h 比 0 h 增长了 48% ( $P < 0.01$ )。其他剂量组中, MDA 含量都表现出先上升后下降的趋势。5 mg/L 剂量组中, MDA 含量在 48 h 比 0 h 增长了 47% ( $P < 0.01$ ), 在 96 h 比 0 h 增长了 41% ( $P < 0.01$ ), 96 h 的 MDA 含量比 48 h 有所下降。10 mg/L、25 mg/L、50 mg/L 剂量组中, MDA 含量在 36 h 比 0 h 增加了 42% ( $P < 0.01$ )、49% ( $P < 0.01$ )、54% ( $P < 0.01$ ), 在 96 h 比 0 h 增加了 29% ( $P < 0.01$ )、32% ( $P < 0.01$ )、32% ( $P < 0.01$ )。从数据可知, 当抑藻剂小球剂量较低或者培养时间较短时, MDA 含量呈现增长趋势, 当剂量高且培养时间延长后, MDA 含量出现减少的情况, 不过相比较正常水平还是有所升高。

### 3.5. 槲皮素对叶绿素荧光参数的影响

最大光化学量子产量  $F_v/F_m$ 、实际光化学量子产量 Yield、最大电子传递速率  $ETR_{max}$  是重要的叶绿素荧光参数。槲皮素 - 壳聚糖抑藻剂小球处理水华鱼腥藻后, 不同剂量组中叶绿素荧光参数的变化如图 7~9 所示。

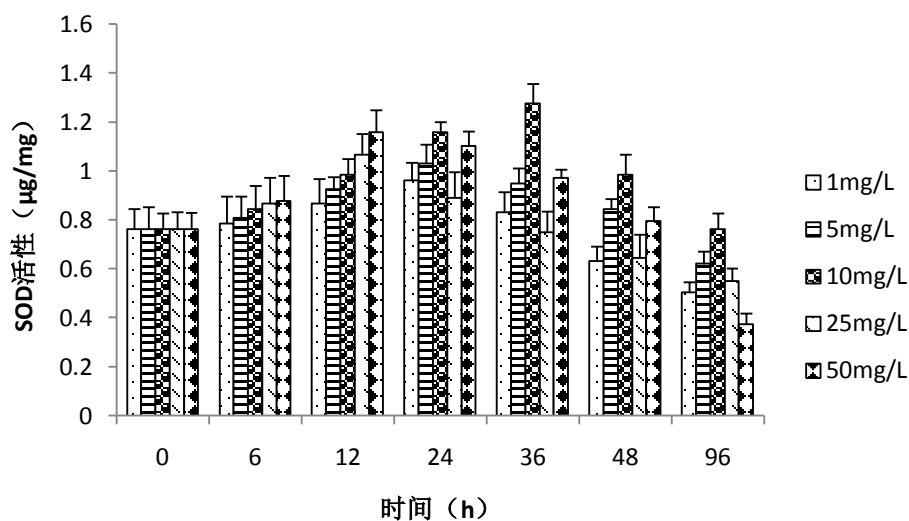
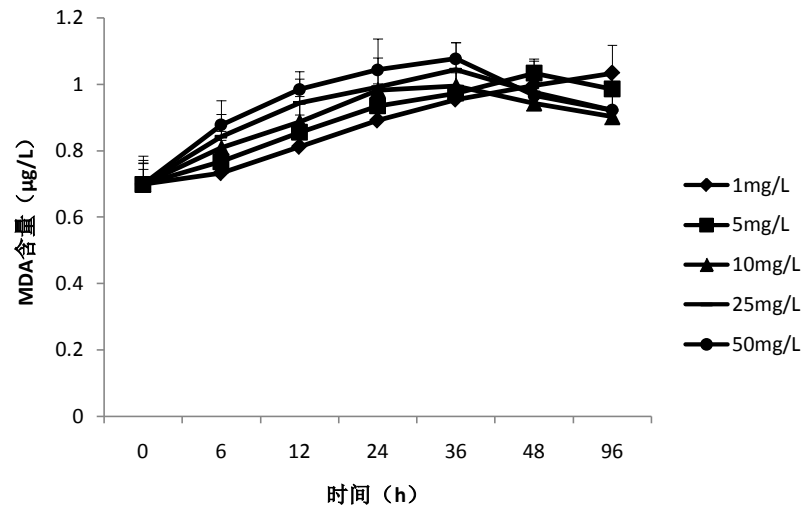
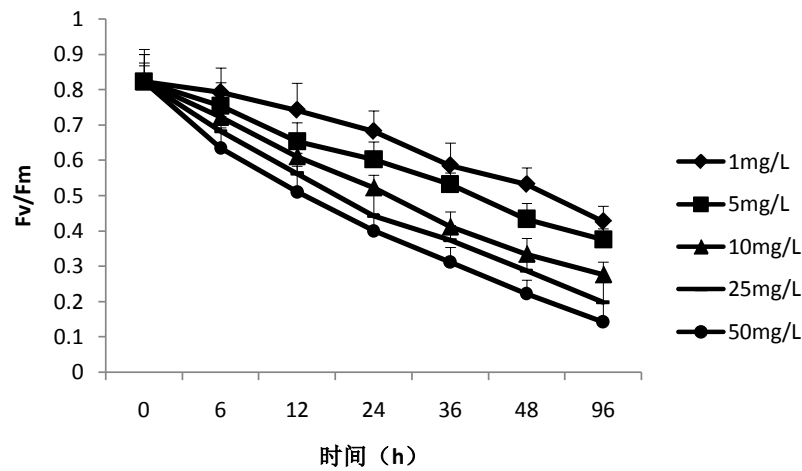


Figure 5. Effect of alginicide beads on SOD activity in *Anabena flos-aquae*

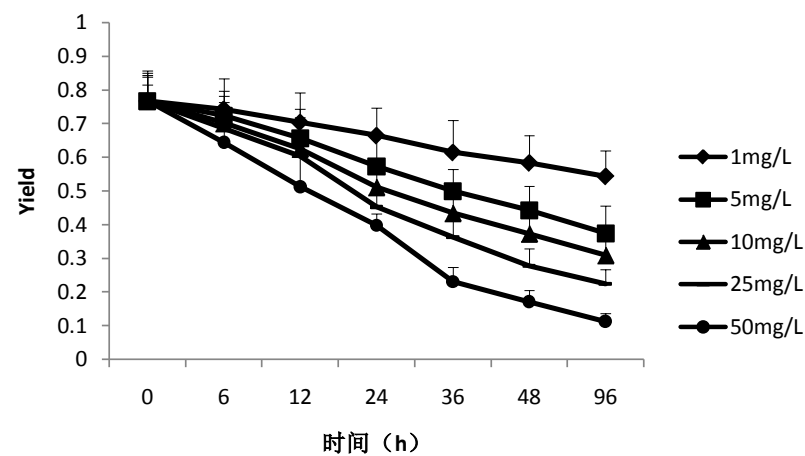
图 5. 抑藻剂小球对水华鱼腥藻 SOD 活性的影响



**Figure 6.** Effect of alginate beads on MDA content in *Anabena flos-aquae*  
**图 6.** 抑藻剂小球对水华鱼腥藻 MDA 含量的影响

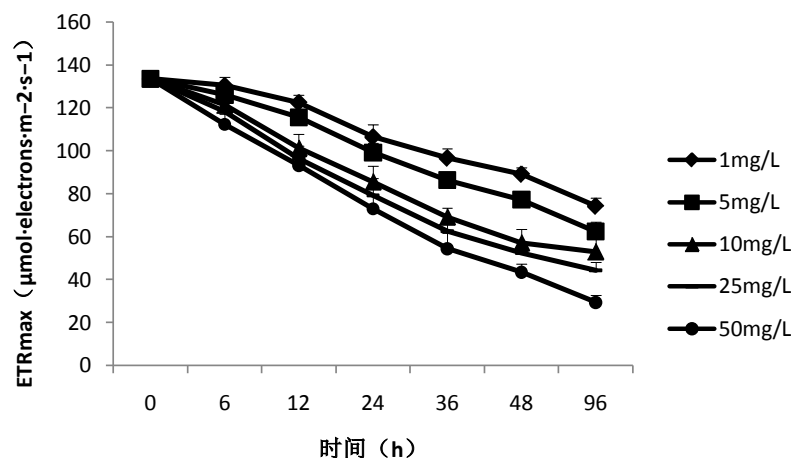


**Figure 7.** Effect of alginate beads on Fv/Fm in *Anabena flos-aquae*  
**图 7.** 抑藻剂小球对水华鱼腥藻 Fv/Fm 的影响



**Figure 8.** Effect of alginate beads on Yield in *Anabena flos-aquae*  
**图 8.** 抑藻剂小球对水华鱼腥藻 Yield 的影响





**Figure 9.** Effect of alginate beads on ETRmax in *Anabena flos-aquae*  
**图 9.** 抑藻剂小球对水华鱼腥藻 ETRmax 的影响

从图中可以明显看出,随着抑藻剂小球剂量的增加和处理时间的延长,水华鱼腥藻的叶绿素荧光参数出现明显的下降趋势,具有显著的时间-剂量效应。培养 96 h 后,在 1 mg/L 剂量组, Fv/Fm、Yield、ETRmax 比 0 h 分别降低了 48% ( $P < 0.01$ )、29% ( $P < 0.01$ )、44% ( $P < 0.01$ ); 在 50 mg/L 剂量组, 三种叶绿素荧光参数比 0 h 分别降低了 83% ( $P < 0.01$ )、85% ( $P < 0.01$ )、78% ( $P < 0.01$ )。

#### 4. 讨论

蓝藻是原核生物,藻细胞内没有叶绿体,但是有光系统 I (PS I)、光系统 II (PS II) 及 ATP 合成酶等蛋白复合体,可以进行光合作用。研究表明,最常见的抑藻机理是通过破坏 PS II,减少电子传递,影响藻类的光合作用,从而抑制藻类正常生理作用[17]。蓝藻中存在着藻胆蛋白,其包括藻红蛋白(PE)、藻蓝蛋白(PC)、藻红蓝蛋白(PEC)和异藻蓝蛋白(APC)。不同的藻胆蛋白组成藻胆体,成为光合作用中 PS II 的捕光色素系统,起到收集光能的作用,并将能量传递给叶绿素 a [18]。本研究数据表明,水华鱼腥藻经槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球处理后,叶绿素 a 含量呈现出时间-剂量效应变化,50 mg/L 剂量组的叶绿素 a 含量在 96 h 降低为 0 h 的 83%; PC 和 APC 的含量随着抑藻剂处理时间的延长和剂量的增加,相对缓慢上升;而 PE 没有出现明显的变化。说明经槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球抑制了水华鱼腥藻叶绿素 a 的合成,藻胆蛋白含量构成发生混乱,PS II 反应中心受到损伤。同时,水华鱼腥藻经抑藻剂小球处理后,叶绿素荧光参数 Fv/Fm、Yield、ETRmax 在 50 mg/L 剂量组,比 0 h 分别降低了 83%、85%、78%。该数据也进一步证明了水华鱼腥藻 PS II 反应中心的电子传递受阻,光合量子产率下降,光合作用受到抑制。有研究人员表明,高浓度的大蒜水提液能阻遏铜绿微囊藻叶绿素 a 的合成,扰乱铜绿微囊藻中藻胆蛋白各组分的构成,降低藻细胞内光反应效率,抑制藻类的生长繁殖,致使其死亡[16]。另有研究发现,水生观赏植物红掌对铜绿微囊藻有生长抑制作用,藻细胞的叶绿素 a 含量下降, Fv/Fm、Yield 降低;浓度为  $4.00 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时, ETRmax 几乎为 0,表明铜绿微囊藻藻细胞 PS II 被严重破坏,光合作用被中止,导致藻类的死亡[19]。因此,槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球抑制水华鱼腥藻生长的机理是通过抑制叶绿素 a 的合成,扰乱藻胆蛋白含量,破坏 PS II 反应中心,阻止光合作用的电子传递,使水华鱼腥藻光合作用效率降低,抑制了正常生长繁殖。

研究表明,连苯三酚会引起铜绿微囊藻的氧化损伤,细胞内部产生大量的 ROS,抗氧化酶的活性大幅提高,随着浓度的增加,抗氧化酶的活性会随之降低[15]。本研究显示,水华鱼腥藻经槲皮素-壳聚糖抑藻剂小球培养后,高剂量组 25 mg/L 和 50 mg/L, SOD 的活性在 12 h 时比 0 h 增加了 39% ( $P < 0.01$ )和

53% ( $P < 0.01$ ), 在 96 h 时比 0 h 降低了 28% ( $P < 0.5$ ) 和 51% ( $P < 0.01$ )。SOD 活性先开始出现上升趋势, 说明水华鱼腥藻细胞内发生氧化损伤, 藻细胞内启动防御机制。而随着培养时间的增加和剂量的增高, SOD 的活性开始下降, 说明水华鱼腥藻产生的氧化损伤超出自身防御限值, 防御系统出现损伤。丙二醛 MDA 含量是判断膜脂过氧化作用强弱的重要指标。槲皮素 - 壳聚糖抑藻剂小球处理水华鱼腥藻后, MDA 含量随着处理时间的延长和剂量的增加呈现增长趋势, 10 mg/L、25 mg/L、50 mg/L 剂量组中, MDA 含量在 36 h 比 0 h 增加了 42% ( $P < 0.01$ )、49% ( $P < 0.01$ )、54% ( $P < 0.01$ )。进一步说明了水华鱼腥藻受到了极大的氧化损伤。

数据表明, 香蒲叶浸提液处理水华鱼腥藻, 低浓度时叶绿素 a 呈上升趋势; 在 50 g/L 浓度下培养 6 d 后叶绿素 a 含量下降, 在 12 d 时叶绿素 a 含量下降显著, 但总体仍比正常时增加一倍; SOD 活性在 6 d 后上升, 但在 12 d 时开始下降, 比正常时降低 14% [20]。黄酮类化合物处理阿氏浮丝藻, 4 mg/L 5,4'-DHF 处理 5 d 后, 阿氏浮丝藻的 rETRmax 降低 8%; 4 mg/L 木犀草素处理 5 d 后, rETRmax 降低 60% 左右 [21]。本研究中, 50 mg/L 剂量组, 叶绿素 a 含量在 96 h 降低为 0 h 的 83%; ETRmax 在 96 h 比 0 h 降低了 78%, 说明光合作用被明显抑制。可以看出槲皮素 - 壳聚糖抑藻剂小球在短期内就能对水华鱼腥藻产生非常显著的生长抑制作用, 是一种新型高效的抑藻剂。

## 5. 结论

1) 槲皮素 - 壳聚糖抑藻剂小球抑制水华鱼腥藻生长的机理是通过抑制叶绿素 a 的合成, 扰乱藻胆蛋白含量, 破坏 PS II 反应中心, 阻止光合作用的电子传递, 使水华鱼腥藻光合作用效率降低, 抑制了正常生长繁殖。

2) 槲皮素 - 壳聚糖抑藻剂小球会对水华鱼腥藻造成极大的氧化损伤。

3) 槲皮素 - 壳聚糖抑藻剂小球是高效的新型抑藻剂, 能有效抑制水华鱼腥藻的生长。

## 参考文献

- [1] Paerl, H.W., Xu, H., Mccarthy, M.J., Zhu, G., Qin, B., Li, Y., *et al.* (2011) Controlling Harmful Cyanobacterial Blooms in a Hyper-Eutrophic Lake (Lake Taihu, China): The Need for a Dual Nutrient (n & p) Management Strategy. *Water Research*, **45**, 1973-1983. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.09.018>
- [2] Tai, N.D., Lam, P.K.S., Shaw, G.R. and Connell, D.W. (2000) Toxicology and Risk Assessment of Freshwater Cyanobacterial (Blue-Green Algal) Toxins in Water. *Reviews of Environmental Contamination & Toxicology*, **163**, 113.
- [3] Paerl, H.W. (2014) Mitigating Harmful Cyanobacterial Blooms in a Human- and Climatically-Impacted World. *Life*, **4**, 988-1012. <https://doi.org/10.3390/life4040988>
- [4] Wang, J., Zhu, J., Liu, S., Liu, B., Gao, Y. and Wu, Z. (2011) Generation of Reactive Oxygen Species in Cyanobacteria and Green Algae Induced by Allelochemicals of Submerged Macrophytes. *Chemosphere*, **85**, 977-982. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.06.076>
- [5] Lelong, A., Haberkorn, H., Goic, N.L., Hégarret, H. and Soudant, P. (2011) A New Insight into Allelopathic Effects of *Alexandrium Minutum*, on Photosynthesis and Respiration of the Diatom *Chaetoceros neogracile*, Revealed by Photosynthetic-Performance Analysis and Flow Cytometry. *Microbial Ecology*, **62**, 919-930. <https://doi.org/10.1007/s00248-011-9889-5>
- [6] 吴程, 常学秀, 董红娟, 等. 粉绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的化感抑制效应及其生理机制[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2595-2603.
- [7] 汪小雄. 三种乔木落叶水浸出液对蓝藻化感抑制作用与机理的研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [8] Wang, M., Zhang, Y. and Guo, P. (2017) Effect of Florfenicol and Thiamphenicol Exposure on the Photosynthesis and Antioxidant System of *Microcystis Flosaquae*. *Aquatic Toxicology*, **186**, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.02.022>
- [9] 张维昊, 周连凤, 吴小刚, 等. 菖蒲对铜绿微囊藻的化感作用[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(3): 355-358.
- [10] Park, M.H., Han, M.S., Ahn, C.Y., Kim, H.S., Yoon, B.D. and Oh, H.M. (2006) Growth Inhibition of Bloom-Forming

Cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* by Rice Straw Extract. *Letters in Applied Microbiology*, **43**, 307-312.

<https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2006.01951.x>

- [11] 黄皓旻. 天然黄酮类化合物的抑藻活性 - 结构关系、作用机制及抑藻剂开发研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [12] 张薛, 胡洪营, 门玉洁. 大麦秆提取液对铜绿微囊藻生长的影响研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(12): 1984-1987.
- [13] 郭沛涌, 刘杨. 一种缓释抑藻剂及其制备方法[P]. 中国专利, CN 102870777 A. 2013.
- [14] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5): 550-552.
- [15] 王捷. 汾河太原河段水华藻及生物源物质抑藻机理研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 山西大学, 2017.
- [16] 胡利静. 铜绿微囊藻环保型抑制剂的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [17] Pellegrini, E., Francini, A., Lorenzini, G. and Nali, C. (2011) Psii Photochemistry and Carboxylation Efficiency in *Liriiodendron Tulipifera* under Ozone Exposure. *Environmental & Experimental Botany*, **70**, 217-226.  
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.09.012>
- [18] Moya, I., Hodges, M. and Barbet, J.C. (1986) Modification of Room-Temperature Picosecond Chlorophyll Fluorescence Kinetics in Green Algae by Photosystem II Trap Closure. *Febs Letters*, **198**, 256-262.  
[https://doi.org/10.1016/0014-5793\(86\)80416-1](https://doi.org/10.1016/0014-5793(86)80416-1)
- [19] 朱嘉成, 周利, 朱佳, 等. 水生观赏植物红掌对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 环境科学研究, 2015, 28(10): 1638-1644.
- [20] 冯彬. 香蒲耐营养盐的生理机制及其对两种水华藻类的化感作用研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江农林大学, 2017.
- [21] 李若冰. 黄酮类化合物抑制水华蓝藻生长繁殖的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)