

坛紫菜对赤潮异弯藻生长和光合活性的影响

见 凯¹, 骆其君^{1*}, 周成旭², 陈再德², 万文琴¹

(1. 宁波大学 海洋学院, 浙江 宁波 315832; 2. 宁波大学 食品与药学学院, 浙江 宁波 315832)

摘要: 以赤潮异弯藻为研究对象, 利用水样叶绿素荧光仪等研究新鲜坛紫菜、灭活坛紫菜、坛紫菜水溶性浸提液和甲醇提取物对有害赤潮微藻生长和光合活性的影响。结果表明: 新鲜坛紫菜具有抑制赤潮异弯藻的生长和光合活性(叶绿素 a 含量、光系统II的最大光能转换效率和相对电子传递速率)的作用; 灭活坛紫菜(3.20 g·L⁻¹)、坛紫菜水溶性浸提液(0.80、1.60 g·L⁻¹)和甲醇提取物(3.20 g·L⁻¹)对赤潮异弯藻的生长和光合活性具有“先抑后促”作用。坛紫菜水溶性浸提液(3.20 g·L⁻¹)对赤潮异弯藻的生长和光合活性具有极显著抑制作用($P < 0.01$)。生长抑制作用大小为坛紫菜水溶性浸提液>灭活坛紫菜>新鲜坛紫菜>坛紫菜甲醇提取物, 坛紫菜可通过释放化感物质来抑制赤潮异弯藻的生长和光合活性, 且主要成分具有水溶性。

关键词: 坛紫菜; 赤潮异弯藻; 叶绿素 a; 最大光能转换效率; 相对电子传递速率

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 06-0020-07

赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)是我国赤潮优势种, 作为一种鱼毒性有害藻^[1-2], 其对猛水蚤和中华哲水蚤具有致死性^[3], 危害海洋生态系统。自然分布于潮间带的大型海藻, 能够抑制有害赤潮微藻的生长^[4-6]和光合作用^[7]。例如, 细基江蓠能够有效地抑制海洋原甲藻的光合作用^[8]; 龙须菜能够抑制锥状斯氏藻的光合作用^[9]。文献^[10]发现大型海藻可以使有害赤潮微藻叶绿素 a 含量下降。

坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)是我国养殖面积最大的大型经济海藻^[11], 养殖范围涉及南海、东海、黄海, 对种质、养殖模式已有报道。坛紫菜的生态效应常以微藻生长抑制率为指标进行评估^[12-13]。目前有关坛紫菜对有害赤潮微藻光合活性影响的研究较为鲜见。

本文以新鲜坛紫菜、灭活坛紫菜、坛紫菜水溶性浸提液和甲醇提取物以及赤潮异弯藻为材料, 利用不同生理状态坛紫菜及其提取物研究其对赤潮异弯藻光合活性的影响, 并对抑制赤潮异弯藻强度进行了评估。研究结果可为抑制有害赤潮藻以及综合评价紫菜栽培的生态效应提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

坛紫菜“浙东 1 号”叶状体于 2018 年 10 月 24 日采自鄞州藤叶紫菜专业合作社的养殖基地。采集后洗净、阴干(脱水率为 65.74%), 密封保存于 -24 °C 冰箱中备用。赤潮异弯藻(NMBRah03-2-2)由宁波大学藻种库提供, 培养温度(23±1) °C, 光照强度 3 000 lx, 光暗比 12 h:12 h。取生长状况良好, 处于指数增长期(10^5 cells·mL⁻¹)的藻液备用。

1.2 仪器

GXZ 型智能光照培养箱(宁波江南仪器厂), WATER-PAM 水样叶绿素荧光仪(德国 Walz 公司), CX41RF 显微镜(日本 Olympus 公司), VORTEX-GENIE2 涡旋仪(美国 Scientific Industries 公司), 3001 酶标仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司), 1-16K 离心机(德国 Sigma 公司)。

1.3 方法

1.3.1 新鲜坛紫菜对赤潮异弯藻光合活性的影响

取 2 g 上述坛紫菜泡在灭菌海水中复苏, 温度

收稿日期: 2019-10-21.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFT0901502); 现代农业产业技术体系专项(CARS-50)。

第一作者: 见凯(1993-), 男, 陕西岐山人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 生态修复. E-mail: 1041756395@qq.com

*通信作者: 骆其君(1965-), 男, 浙江宁海人, 教授, 主要研究方向: 藻类生物技术. E-mail: luojijun@nbu.edu.cn

(23±1) °C, 光照强度 3 000 lx, 光暗比 12 h:12 h. 选取复苏后生长正常的个体, 刷洗 3 次, 清除表面附着物和杂藻, 添加到 100 mL 藻液中. 新鲜坛紫菜的质量浓度分别设置为 0、0.80、1.60、3.20 g·L⁻¹. 实验设 3 组平行, 培养周期为 96 h.

1.3.2 灭活坛紫菜对赤潮异弯藻光合活性的影响

准确称取 0、0.025、0.050、0.100 g 上述坛紫菜干品各 3 份, 100 °C 水浴 3 min, 灭活后添加到 100 mL 藻液中. 对应新鲜坛紫菜质量浓度为 0、0.80、1.60、3.20 g·L⁻¹. 实验设 3 组平行, 培养周期为 96 h.

1.3.3 坛紫菜水溶性浸提液对赤潮异弯藻光合活性的影响

取 2 g 上述坛紫菜干品, 研磨成粉末与灭菌海水混合, 涡旋 5 min, 离心, 将粉末和浸提液分离, 重复浸提 2 次. 合并 3 次浸提所得到的 40 mL 溶液, 浸提液质量浓度为 50 g·L⁻¹. 用 0.22 μm 水系滤膜过滤, 添加到 100 mL 藻液中, 对应新鲜坛紫菜质量浓度分别为 0、0.80、1.60、3.20 g·L⁻¹. 接种 2 h 后开始检测^[14]. 实验设 3 组平行, 培养周期为 96 h.

1.3.4 坛紫菜甲醇提取物对赤潮异弯藻光合活性的影响

取 10 g 上述坛紫菜干品, 研磨成粉末后与 100 mL 甲醇混合, 放置在 100 r·min⁻¹ 摇床上, 20 °C 黑暗环境下晃动 48 h, 离心, 将粉末和提取溶液分离. 所得粉末再重复提取 2 次. 合并 3 次提取所得的 300 mL 溶液, 用 0.22 μm 有机系滤膜过滤, 旋转减压蒸干甲醇. 称取甲醇提取物, 添加到 100 mL 藻液中, 使对应新鲜坛紫菜质量浓度分别为 0、0.80、1.60、3.20 g·L⁻¹. 实验设 3 组平行, 培养周期 96 h.

1.4 生理生化指标的测定

1.4.1 生长抑制率

赤潮异弯藻的生长抑制率计算公式为:

$$I = (1 - N / N_0) \times 100\%,$$

式中: N 为处理组藻生物量; N_0 为对照组藻生物量.

1.4.2 叶绿素 a 含量测定

根据 Porra 公式^[15]测定叶绿素 a 含量. 取藻样 1 mL, 12 000 r·min⁻¹ 离心 15 min, 酶标仪测定.

1.4.3 叶绿素荧光参数测定

取藻样 1 mL, 暗处理 15 min^[16], 使用 WATER-PAM 测定叶绿素荧光诱导曲线, 记录光系统 II (PSII) 最大光能转换效率 (Fv/Fm). 设置 1 249

(μmol·m⁻²)·s⁻¹ 测定 PSII 相对电子传递速率 (rETR).

1.5 数据处理

采用 Excel 2013、Origin 8.0 和 SPSS 16.0 软件对数据进行处理. 用单因素方差分析, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著性判别依据.

2 结果和分析

2.1 新鲜和灭活坛紫菜及其提取物对赤潮异弯藻生长的影响

新鲜和灭活坛紫菜及其提取物对赤潮异弯藻生长的影响见表 1. 从表 1 可知, 24 h 时, 除 0.80 g·L⁻¹ 新鲜坛紫菜和甲醇提取物处理组外, 其他各组对赤潮异弯藻均具有显著抑制作用 ($P < 0.05$); 从 48 h 开始, 新鲜坛紫菜和 3.20 g·L⁻¹ 坛紫菜水溶性浸提液对赤潮异弯藻有极显著抑制作用 ($P < 0.01$); 而灭活坛紫菜和 0.80、1.60 g·L⁻¹ 坛紫菜水溶性浸提液以及甲醇提取物则促进微藻生长; 整个实验中 3.20 g·L⁻¹ 坛紫菜水溶性浸提液、灭活和新鲜坛紫菜及其甲醇提取物对赤潮异弯藻的最大生长抑制率分别为 97.13%、60.95%、55.64% 和 21.13%.

表 1 新鲜和灭活坛紫菜及其提取物对赤潮异弯藻生物量的影响

坛紫 质量浓度/		赤潮异弯藻生物量/(×10 ⁴ cells·mL ⁻¹)			
菜	(g·L ⁻¹)	24 h	48 h	72 h	96 h
新鲜	0	15.04±0.33	24.13±1.99	27.88±2.75	34.38±0.63
	0.80	15.04±0.51	15.79±0.95**	18.75±2.63**	23.67±0.39**
	1.60	13.44±0.31**	14.33±0.93**	15.88±0.38**	17.54±1.08**
	3.20	13.21±0.46**	16.13±0.13**	15.19±0.56**	15.25±0.61**
灭活	0.80	11.97±0.31**	27.18±0.57*	30.99±2.31	36.18±2.34
	1.60	10.56±0.37**	27.14±1.74*	32.05±1.07	43.23±2.39**
	3.20	5.88±0.38**	25.00±0.30	33.54±4.30	43.98±2.46**
浸出液	0.80	11.09±0.26**	20.05±0.62**	32.97±1.18**	38.57±1.84**
	1.60	9.50±0.33**	17.30±0.38**	35.66±0.44**	36.78±0.01
	3.20	0.43±0.07**	0.26±0.07**	0.25±0.06**	0.19±0.01**
甲醇提取 物	0.80	16.48±0.41*	28.62±0.79	29.44±0.75	38.36±0.31*
	1.60	13.55±0.21*	31.71±1.13*	33.40±0.75	44.53±0.88**
	3.20	11.87±0.31**	31.30±0.31*	41.11±1.23**	50.66±0.56**

注: *和**表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著. 下表同.

2.2 新鲜坛紫菜对赤潮异弯藻光合活性的影响

2.2.1 新鲜坛紫菜对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量的影响

新鲜坛紫菜对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量的影

响如图 1 所示. 从图 1 可知, 在 24、48 h 时, 处理组赤潮异弯藻叶绿素 a 含量低于对照组, 从 72 h 开始, 处理组叶绿素 a 含量与对照组相比有极显著差异($P<0.01$), 且处理组坛紫菜浓度越高, 叶绿素 a 含量越低.

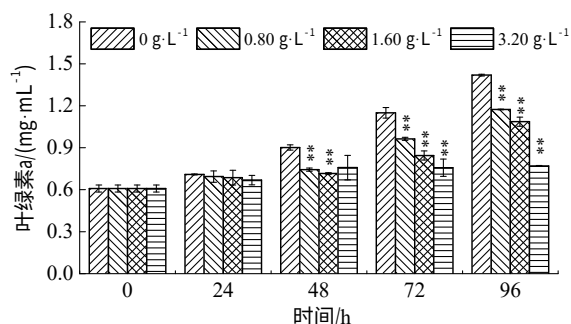


图 1 新鲜坛紫菜对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量的影响

2.2.2 新鲜坛紫菜对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响

坛紫菜对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响如图 2 所示. 从图 2 可知, 24、48 h 时, 0.80、1.60 g·L⁻¹ 处理组对赤潮异弯藻 Fv/Fm 影响极显著($P<0.01$); 72、96 h 时, 1.60、3.20 g·L⁻¹ 处理组对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响极显著($P<0.01$), 且处理组 Fv/Fm 随新鲜坛紫菜浓度增加而降低.

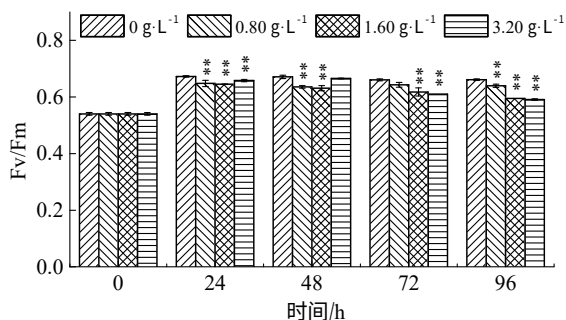


图 2 新鲜坛紫菜对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响

2.2.3 新鲜坛紫菜对赤潮异弯藻 rETR 的影响

坛紫菜对赤潮异弯藻 rETR 的影响如图 3 所示.

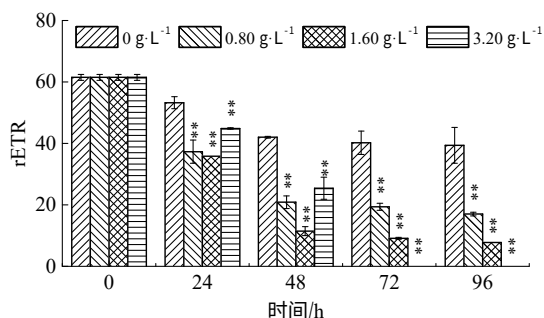


图 3 新鲜坛紫菜对赤潮异弯藻 rETR 的影响

示. 从图 3 可知, 坛紫菜与赤潮异弯藻共培养后, 各处理组赤潮异弯藻 rETR 表现出极显著抑制作用($P<0.01$). 在 72、96 h 时, 3.20 g·L⁻¹ 处理组赤潮异弯藻 rETR 为 0, 且处理组中坛紫菜浓度越高, 赤潮异弯藻 rETR 越低.

2.3 灭活坛紫菜对赤潮异弯藻光活性的影响

2.3.1 灭活坛紫菜对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量的影响

灭活坛紫菜对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量的影响如图 4 所示. 从图 4 可知, 24 h 时 0.80、1.60 g·L⁻¹ 处理组叶绿素 a 含量高于对照组; 48 h 时 1.60、3.20 g·L⁻¹ 处理组对叶绿素 a 含量有显著促进作用($P<0.05$); 从 72 h 开始, 各处理组对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量有极显著促进作用($P<0.01$), 且浓度越高, 叶绿素 a 含量越高.

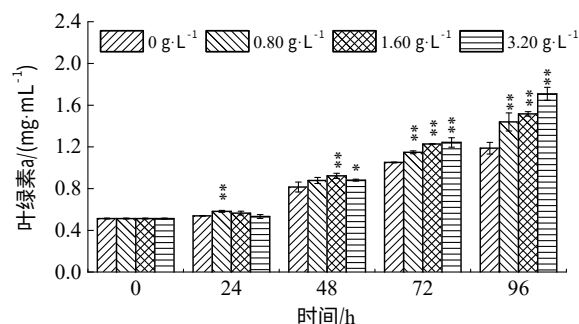


图 4 灭活坛紫菜对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量的影响

2.3.2 灭活坛紫菜对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响

灭活坛紫菜对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响如图 5 所示. 从图 5 可知, 整个实验过程中, 0.08、1.60 g·L⁻¹ 处理组对赤潮异弯藻 Fv/Fm 影响不显著; 24 h 时 3.20 g·L⁻¹ 处理组对 Fv/Fm 有极显著抑制作用($P<0.01$); 48 h 后处理组 Fv/Fm 高于对照组, 但影响不显著.

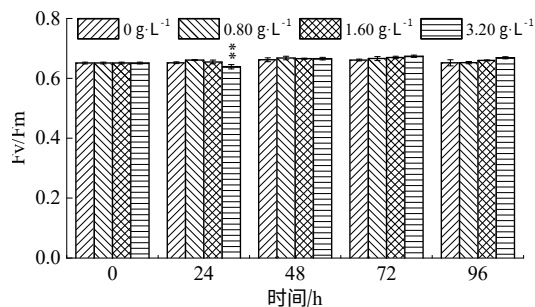


图 5 灭活坛紫菜对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响

2.3.3 灭活坛紫菜对赤潮异弯藻 rETR 的影响

灭活坛紫菜对赤潮异弯藻 rETR 的影响如图 6

所示. 从图6可知, 24 h 时 0.80、1.60 g·L⁻¹ 处理组对赤潮异弯藻 rETR 有极显著促进作用($P<0.01$); 从 48 h 开始 3.20 g·L⁻¹ 处理组对 rETR 具有极显著促进作用($P<0.01$), 且处理组浓度越高, rETR 越大.

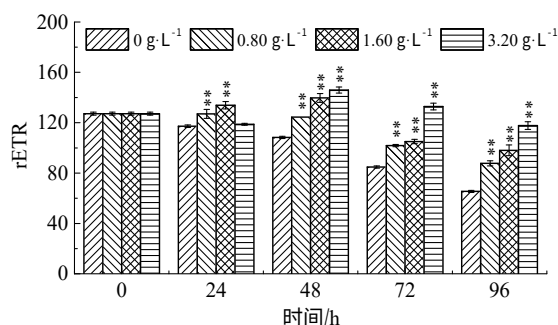


图6 灭活坛紫菜对赤潮异弯藻 rETR 的影响

2.4 坛紫菜水溶性浸提液对赤潮异弯藻光合活性的影响

2.4.1 坛紫菜水溶性浸提液对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量的影响

坛紫菜水溶性浸提液对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量的影响如图7所示. 从图7可知, 添加坛紫菜水溶性浸提液后, 在 24、48、72 h 时, 0.80 g·L⁻¹ 处理组对叶绿素 a 含量有极显著促进作用($P<0.01$). 3.20 g·L⁻¹ 处理组对叶绿素 a 含量抑制作用极显著($P<0.01$).

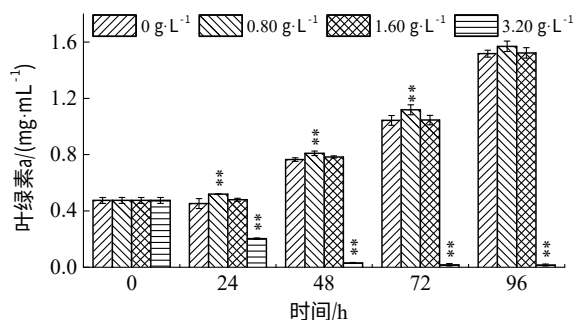


图7 坛紫菜水溶性浸提液对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量的影响

2.4.2 坛紫菜水溶性浸提液对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响

在 2、24、48、72 h 时, 不同浓度坛紫菜水溶性浸提液对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响见表2. 从表2可知, 在 2 h 时处理组赤潮异弯藻 Fv/Fm 与对照组相比受到极显著抑制($P<0.01$), 且浓度越大抑制作用越强. 24 h 后, 0.80、1.60 g·L⁻¹ 处理组对 Fv/Fm 影响不明显; 3.20 g·L⁻¹ 处理组对 Fv/Fm 有极显著抑

制作用($P<0.01$), 且 Fv/Fm 为 0.

表2 坛紫菜水溶性浸提液对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响

时间/h	坛紫菜水溶性浸提液质量浓度/(g·L ⁻¹)			
	0	0.80	1.60	3.20
2	0.64±0	0.61±0**	0.61±0**	0.60±0.01**
24	0.61±0.01	0.61±0	0.61±0.01	0**
48	0.63±0	0.63±0	0.64±0	0**
72	0.65±0	0.64±0.01	0.63±0.02	0**

2.4.3 坛紫菜水溶性浸提液对赤潮异弯藻 rETR 的影响

坛紫菜水溶性浸提液对赤潮异弯藻 rETR 的影响如图8所示. 从图8可知, 在 24、48、72 h 时, 赤潮异弯藻 rETR 呈现“低促高抑”的趋势, 坛紫菜水溶性浸提液对其有极显著促进作用($P<0.01$). 而 3.20 g·L⁻¹ 处理组, 对赤潮异弯藻 rETR 有极显著抑制作用($P>0.01$), 且处理组浓度越高, rETR 越低.

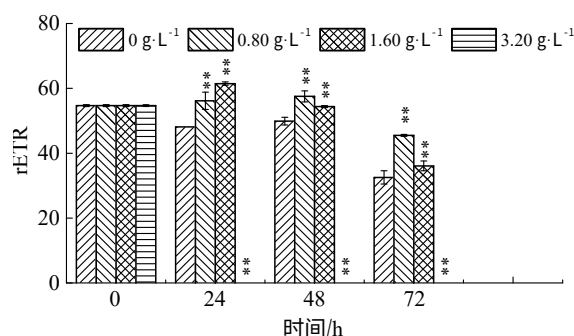


图8 坛紫菜水溶性浸提液对赤潮异弯藻 rETR 的影响

2.5 坛紫菜甲醇提取物对赤潮异弯藻光合活性的影响

2.5.1 坛紫菜甲醇提取物对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量的影响

坛紫菜甲醇提取物对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量的影响如图9所示. 从图9可知, 在 24 h 时处理

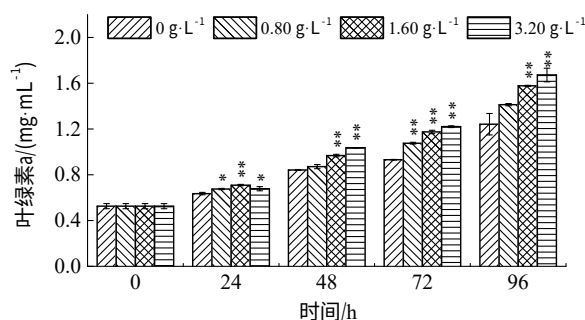


图9 坛紫菜甲醇提取物对赤潮异弯藻叶绿素 a 含量的影响

组叶绿素 a 含量显著高于对照组($P<0.05$). 从 48 h 开始, 1.60 、 $3.20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组对叶绿素 a 含量有极显著促进作用($P<0.01$), 且处理组浓度越高叶绿素 a 含量越高.

2.5.2 坛紫菜甲醇提取物对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响

坛紫菜甲醇提取物对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响如图 10 所示. 从图 10 可知, 低浓度处理组对赤潮异弯藻抑制效果不明显, 24 h 时 $3.20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组对 Fv/Fm 有极显著抑制作用($P<0.01$), 从 48 h 开始 1.60 、 $3.20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组对 Fv/Fm 有显著促进作用($P<0.05$).

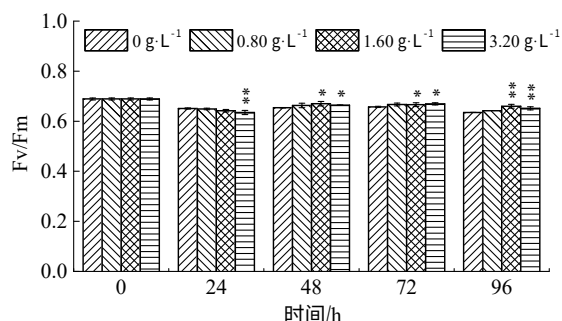


图 10 坛紫菜甲醇提取物对赤潮异弯藻 Fv/Fm 的影响

2.5.3 坛紫菜甲醇提取物对赤潮异弯藻 rETR 的影响

坛紫菜甲醇提取物对赤潮异弯藻 rETR 的影响如图 11 所示. 从图 11 可知, 24 h 时 $3.20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组对赤潮异弯藻 rETR 具有抑制作用, 从 48 h 开始 1.60 、 $3.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组对 rETR 有极显著促进作用($P<0.01$), 且处理组浓度越高促进作用越强.

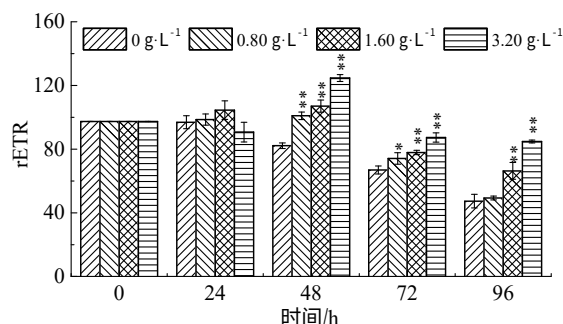


图 11 坛紫菜甲醇提取物对赤潮异弯藻 rETR 的影响

3 讨论

3.1 化感物质对赤潮异弯藻生长的影响

新鲜坛紫菜、灭活坛紫菜、坛紫菜水溶性浸提液和甲醇提取物抑制赤潮异弯藻的生长, 这一结果与文献[17]一致. 48 h 时, 灭活坛紫菜、坛紫菜水

溶性浸提液(0.80 、 $1.60 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)和甲醇提取物促进赤潮异弯藻的生长, 这可能是化感物质降解和坛紫菜中的营养物质促进赤潮异弯藻的生长. 文献[18]提出化感物质可快速降解; 文献[19]提到高温煮沸龙须菜水溶性抽提液能促进赤潮异弯藻的生长. 通过比较, $3.20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组最大生长抑制率大小为坛紫菜水溶性浸提液>灭活坛紫菜>坛紫菜甲醇提取物, 表明坛紫菜中存在化感物质, 这与文献[20]研究结果相似. 坛紫菜影响赤潮异弯藻的主要化感物质是水溶性的, 文献[21]提到水溶性有机酸为化感物质, 且有文献报道亚油酸^[22]、亚麻酸^[23]、二十碳五烯酸^[24]对赤潮异弯藻生长具有抑制作用.

3.2 化感物质对赤潮异弯藻光合活性的影响

赤潮异弯藻中添加新鲜坛紫菜, 其生物量和叶绿素 a 含量降低, 这与文献[25]报道一致. 藻是自养生物, 含有叶绿素 a, 能够吸收、传递和转化光能^[26-27]. 叶绿素 a 含量反映赤潮异弯藻受伤害程度, 可以表征其生物量的变化, 叶绿素 a 含量降低, 其生长受到抑制, 则生物量降低.

赤潮异弯藻的生物量变化与其光合活性有关. Fv/Fm、rETR 与光合作用密切相关^[16]. 新鲜坛紫菜使赤潮异弯藻 Fv/Fm、rETR 降低, 这与文献[28]研究结果相似. Fv/Fm 本质上揭示了光系统内发生光捕获的最大潜力^[29]; rETR 反映了植物光合作用的强弱^[30]. Fv/Fm 降低表示赤潮异弯藻 PSII 反应中心受到了伤害, 光捕获能力降低; rETR 降低表明光合电子传递链受阻, 电子传递能力降低. 文献[14]发现大型海藻能够抑制有害赤潮微藻 PSII 的活性, 阻碍 PSII 电子传递.

24 h 时一定质量浓度(0.80 、 $1.60 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)的灭活坛紫菜、坛紫菜水溶性浸提液和甲醇提取物促进赤潮异弯藻光合活性, 这与文献[31]结果相似; 而赤潮异弯藻生物量降低, 可能与化感物质降解以及藻类应激性有关, 导致赤潮异弯藻 PSII 活性上升; 文献[32]认为这与植物应激性有关. $3.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 灭活坛紫菜、坛紫菜水溶性浸提液和甲醇提取物使赤潮异弯藻光合活性降低, 这与文献[33]结果一致. 可能是赤潮异弯藻 PSII 活性受到损害, 光捕获、转化能力降低, 光合电子链传递受阻. 48 h 后, 质量浓度为 $3.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灭活坛紫菜和甲醇提取物对赤潮异弯藻光合活性表现为促进作用, 可能是 PSII 活性恢

复.坛紫菜中化感物质对赤潮异弯藻的光合活性有抑制作用,如质量浓度为 $3.2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 水溶性浸提液对赤潮异弯藻光合活性抑制作用最强;但低浓度表现为促进作用,所以选择合适的化感物质以及化感物质用量非常重要.

4 结论

新鲜坛紫菜、灭活坛紫菜、坛紫菜水溶性浸提液和甲醇提取物对赤潮异弯藻的生长抑制作用大小为坛紫菜水溶性浸提液>灭活坛紫菜>新鲜坛紫菜>坛紫菜甲醇提取物.坛紫菜中的化感物质影响赤潮异弯藻的生长和光合活性,且主要成分是水溶性的,但该化感物质还有待进一步分离和鉴定.

参考文献:

- [1] 许妍,董双林,于晓明.缘管浒苔对赤潮异弯藻的克生效应[J].生态学报,2005,25(10):2681-2685.
- [2] 陈桃英,聂思宇,杨欣,等.赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)对蒙古裸腹溞(*Moina mongolica*)和日本新糠虾(*Neomysis japonica*)的毒性影响[J].海洋与湖沼,2010,41(2):186-191.
- [3] 刘青,王碧雪.赤潮异弯藻对2种桡足类的急性毒性效应[C]//2011年中国水产学会学术年会论文集.厦门,2011:285.
- [4] Flores-Molina M R, Thomas D, Lovazzano C, et al. Desiccation stress in intertidal seaweeds: Effects on morphology, antioxidant responses and photosynthetic performance[J]. Aquatic Botany, 2014, 113:90-99.
- [5] Tang Y Z, Gobler C J. The green macroalga, *Ulva lactuca*, inhibits the growth of seven common harmful algal bloom species via allelopathy[J]. Harmful Algae, 2011, 10(5):480-488.
- [6] 李娟.大型海藻对高度富营养化水体赤潮发生抑制作用的营养盐竞争机制研究[D].厦门:厦门大学,2007.
- [7] 邹华,邓继选,朱银.植物化感作用在控制水华藻类中的应用[J].食品与生物技术学报,2012,31(2):134-140.
- [8] Ye C P, Zhang M C. Allelopathic effect of macroalga *Gracilaria tenuistipitata* (rhodophyta) on the photosynthetic apparatus of red-tide causing microalga *Prorocentrum micans*[J]. IERI Procedia, 2013, 5:209-215.
- [9] Ye C P, Liao H P, Yang Y F. Allelopathic inhibition of photosynthesis in the red tide-causing marine alga, *Scrippsiella trochoidea* (Pyrrophyta), by the dried macroalga, *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta)[J]. Journal of Sea Research, 2014, 90:10-15.
- [10] 李斌.海洋大型藻类对微藻类的化感作用[D].大连:大连海事大学,2015.
- [11] 李晓蕾.红毛菜科海藻应对逆境胁迫的光合和抗氧化生理响应[D].上海:上海海洋大学,2017.
- [12] Tang Y Z, Kang Y, Berry D N, et al. The ability of the red macroalga, *Porphyra purpurea* (Rhodophyceae) to inhibit the proliferation of seven common harmful microalgae[J]. Journal of Applied Phycology, 2015, 27(1):531-544.
- [13] 孙颖颖,徐深圳,张静,等.浒苔和紫菜等2种海藻干体对3种赤潮微藻生长的抑制作用[J].海洋通报,2012,31(4):433-440.
- [14] 罗丽娜.四种大型海藻对赤潮异弯藻抑制作用的光合作用机理[D].广州:暨南大学,2016.
- [15] Porra R J. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls *a* and *b*[J]. Photosynthesis Research, 2002, 73:633-640.
- [16] 江灵芝,孙雪,王玮蔚,等.盐度对蛋白核小球藻生长、叶绿素荧光参数及代谢酶的影响[J].宁波大学学报(理工版),2013,26(3):6-10.
- [17] 南春容,张海智,董双林.孔石莼水溶性抽提液抑制3种海洋赤潮藻的生长[J].环境科学学报,2004,24(4):702-706.
- [18] Nan C R, Zhang H Z, Lin S Z, et al. Allelopathic effects of *Ulva lactuca* on selected species of harmful bloom-forming microalgae in laboratory cultures[J]. Aquatic Botany, 2008, 89(1):9-15.
- [19] 雷光英,杨宇峰,李宵.龙须菜对赤潮异弯藻和海洋原甲藻的生长抑制效应[J].海洋环境科学,2010,29(1):27-31.
- [20] Sun Y Y, Xing J Z, Zhang J S, et al. Sesquiterpenoids with antialgal activity against the common red tide microalgae from marine macroalga *Porphyra yezoensis*[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(8):7844-7859.
- [21] 刘倩.亚油酸对赤潮异弯藻和东海原甲藻的克生效应及细胞凋亡机制的研究[D].曲阜:曲阜师范大学,2016.
- [22] 杨小茹,苏建强,郑天凌.化感作用在赤潮调控中的意义及前景[J].环境科学学报,2008,28(2):219-226.
- [23] 夏钰妹,孙雪,徐年军,等. α -亚麻酸对赤潮异弯藻生长的抑制作用[J].中国环境科学,2012,32(5):880-885.
- [24] 张晓宇.二十碳五烯酸对赤潮微藻氧化胁迫的影响及细胞凋亡机制的研究[D].曲阜:曲阜师范大学,2015.
- [25] 孙颖颖,刘筱潇,阎斌伦,等.条斑紫菜提取物对4种赤潮微藻生长的抑制作用[J].水产学报,2010,34(5):

- 796-806.
- [26] 陈友根, 朱世东, 陶鸿, 等. 大蒜根系水浸液处理对连作甜瓜光合及荧光特性的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(12):339-343.
- [27] 付春霞, 张元珍, 王衍安, 等. 缺锌胁迫对苹果叶片光合速率及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18):3826-3833
- [28] 张梦成. 大型海藻裂片石莼对三种典型赤潮藻抑制作用的光合生理机制[D]. 广州: 暨南大学, 2014.
- [29] Zhang X X, Tang X X, Zhou B, et al. Effect of enhanced UV-B radiation on photosynthetic characteristics of marine microalgae *Dunaliella salina* (Chlorophyta, Chlorophyceae)[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2015, 469:27-35.
- [30] 杨小舟, 郑新庆, 林荣澄, 等. 三种大型绿藻光合能力的差异及其在珊瑚养殖中的应用[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6):1528-1533.
- [31] 姜恒, 吴斌, 阎冰, 等. 桉树叶水浸出液对 2 种海洋微藻生长和叶绿素荧光特性的影响[J]. 环境科学研究, 2013, 26(11):1186-1193.
- [32] 王淑智, 李利, 张道勇, 等. NaCl 与 Cd 对小球藻光系统II(PSII)活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(6):839-846.
- [33] 朱嘉成. 化感植物——填料浮床抑制藻类生长的试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.

Effects of *Pyropia haitanensis* on growth and photosynthetic activity of *Heterosigma akashiwo*

JIAN Kai¹, LUO Qijun^{1*}, ZHOU Chengxu², CHEN Zaide², WAN Wenqin¹

(1.School of Marine Science, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2.College of Food and Pharmaceutical Sciences, Ningbo University, Ningbo 315832, China)

Abstract: The effects of fresh *Pyropia haitanensis*, inactivated *P. haitanensis*, water-soluble extract and methanol extract of *P. haitanensis* on the growth and photosynthetic activity of *Heterosigma akashiwo* were studied using the chlorophyll fluorescence technology. Results showed that fresh *P. haitanensis* effectively inhibited the growth and photosynthetic activity of *H. akashiwo* (the content of chlorophyll a, maximal photochemical efficiency of photosystem II and relative electron transport rate). Inactivated *P. haitanensis* (3.20 g·L⁻¹), the water-soluble extracts (0.80, 1.60 g·L⁻¹) and methanol extracts (3.20 g·L⁻¹) of *P. haitanensis* presented “initial inhibition and subsequent promotion” on the growth and photosynthetic activity of *H. akashiwo*. The water-soluble extract of *P. haitanensis* (3.20 g·L⁻¹) had a significant inhibitory effect on the growth and photosynthetic activity of *H. akashiwo* ($P < 0.01$). The sequence of growth inhibitory effect was water-soluble extract > inactivated *P. haitanensis* > fresh *P. haitanensis* > methanol extract. The results indicates that *P. haitanensis* may inhibit the growth and photosynthetic activity of *H. akashiwo* by releasing water-soluble allelochemicals.

Key words: *Pyropia haitanensis*; *Heterosigma akashiwo*; chlorophyll a; maximal photochemical efficiency; relative electron transport rate

(责任编辑 史小丽)