

文章编号: 1674 - 5566(2014)02 - 0215 - 07

次氯酸钠对扁浒苔叶绿素荧光特性及光合速率的影响

朱莹^{1,2}, 张建恒^{1,2}, 华梁^{1,2}, 何培民^{1,2}, 曲宪成¹, 于克锋^{1,2}

(1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 海洋科学研究院, 上海 201306)

摘要: 以江苏如东紫菜养殖海区的绿藻群落构成种扁浒苔 (*Ulva compressa*) 为研究对象, 通过叶绿素提取法、叶绿素荧光技术及液相氧电极研究了不同浓度次氯酸钠溶液对其叶绿素组成、荧光特性和光合速率的作用情况。结果表明: 扁浒苔叶绿素含量和荧光特性随着 NaClO 浓度的升高均呈现逐渐递减的趋势, 经 10.0 mmol/L 的 NaClO 溶液处理后, 藻体叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量分别为 0.030 mg/g, 0.039 mg/g; 0 ~ 6.00 mmol/L 的 NaClO 对扁浒苔叶绿素荧光参数 Fv/Fm 有显著影响; 10.0 ~ 100.0 μ mol/L 次氯酸钠在 3 min 就能使扁浒苔的光合放氧速率大幅下降, 其中 100 μ mol/L 组对对照组的 1 315 nmol O₂/(min · g) 降至 -472 nmol O₂/(min · g)。根据实验结果和实际海区验证, 4.0 mmol/L 的 NaClO 可以作为清除紫菜养殖海区绿藻的理想试剂。

研究亮点: 如何简便经济地清除附着在紫菜筏架上的绿藻, 已成为制约紫菜栽培正常开展的一个技术难题。本文发现用具有自然分解性质的次氯酸钠溶液处理扁浒苔中苗 (体长 5 cm 左右), 可使藻体光合系统受损从而抑制其生长甚至死亡, 达到高效无污染清除绿藻的目的。

关键词: 扁浒苔; 次氯酸钠; 叶绿素荧光; 光合速率

中图分类号: S 917

文献标志码: A

扁浒苔 (*Ulva compressa*) 属于绿藻门 (Chlorophyta)、石莼目 (Ulvales)、石莼科 (Ulvaceae)、石莼属 (*Ulva*), 该属中浒苔类还有缘管浒苔 (*Ulva linza*)、浒苔 (*Ulva prolifera*) 等。其广泛分布于中、低潮区的砂砾、岩石、滩涂和石沼海岸中。浒苔属海藻发育的早期固着丛生在岩石等基质上, 成长后可在水中自由漂浮, 其自然繁殖能力强, 生长旺盛期主要在 12 月至次年 4 月^[1]。

2007 至 2013 年, 黄海海域已经连续 7 年爆发了绿潮灾害, 造成了严重的生态和经济问题。其中, 扁浒苔是绿潮发生早期类群演替过程的重要组成种之一^[2], 其在适宜的条件下也可以迅速聚集生长形成灾害^[3]。有文献报道扁浒苔是 2009 - 2012 江苏沿岸紫菜养殖海区绿藻群落的构成种^[2, 4-5]。绿藻是江苏省条斑紫菜 (*Porphyra yezoensis*) 养殖的主要灾害之一, 其严重降低了紫

菜的产量和品级率, 给江苏省的紫菜业造成了巨大的经济损失^[6-7]。

次氯酸钠 (NaClO) 具有强氧化性, 在水处理中用作消毒剂、净水剂、杀菌剂^[8], 也是常用的杀藻药剂^[9-11]。目前 NaClO 在杀藻方面的研究还仅见于对水体中微藻的影响, 本文以扁浒苔为研究对象, 研究不同浓度的 NaClO 溶液对扁浒苔叶绿素含量、荧光特性及其光合放氧速率的影响, 以期消除紫菜筏架上和海区漂浮的绿藻提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验扁浒苔 (*U. compressa*) 采集于江苏如东紫菜养殖海区。选择健康藻体, 用毛刷刷轻轻洗净藻体表面污泥和附生杂藻, 然后用消毒海水清洗藻体, 经显微镜镜检确认藻体无杂藻污染后进行

收稿日期: 2013-10-15 修回日期: 2013-12-05

基金项目: 科技部支撑计划项目 (2012BACD7B03); 国家海洋公益性项目 (201205012, 201105023)

作者简介: 朱莹 (1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水域环境生态修复。E-mail: y_zhu1988@163.com

通信作者: 于克锋, E-mail: kfyu@shou.edu.cn

扩大培养,培养温度为 $(20.5 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、盐度为 20 ± 0.5 、光照强度为 $(60 \pm 5) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、光周期为 12D:12L,在添加了 VES 培养液的消毒海水中连续充气培养。定期对藻体进行叶绿素荧光特性的测定,直至藻体的 PS II 最大光化学量子产量 F_v/F_m 达到 0.6 以上。

1.2 实验设计

用海水培养液与 5.2% 次氯酸钠原液配制不同浓度 NaClO 溶液,有效氯浓度梯度为:2.00、4.00、6.00、8.00、10.00 mmol/L,海水培养液作为空白对照,计为 0 mmol/L。选择健康藻体(5 cm)分成若干组,每条约 1.00 g,将其分别浸泡于 100 mL 不同浓度 NaClO 溶液中,静置 5 min 后用海水培养液清洗干净,测定藻体的叶绿素含量和荧光特性,每个浓度重复 3 次,计算平均值。

1.3 叶绿素光谱特性及含量的测定

采用丙酮提取法测定藻体中的色素含量。取新鲜扁浒苔藻体约 0.5 g,用滤纸轻轻吸干藻体表面水分,于研钵中液氮研磨,藻体磨碎后加少许石英砂和 5 mL 丙酮继续研磨,然后加入 5 mL 80% 丙酮抽提,4 200 × g 室温离心 15 min,弃沉淀,再用 80% 丙酮定容上清至 25 mL。吸光度测定通过紫外可见分光光度计 T6 新世纪进行。以 80% 丙酮作为参比,对样品进行 350 ~ 700 nm 的波长扫描。读取 663 nm(叶绿素 a 光吸收波长)和 645 nm(叶绿素 b 光吸收波长)处的吸光值。叶绿素 a 的浓度(C_a)和叶绿素 b 的浓度(C_b)分别按照下列公式计算^[12],单位为 mg/L。最后根据稀释倍数计算每克鲜重藻体中的色素含量,单位为 mg/g。

$$C_a = 12.7A_{663} - 2.69A_{645} \quad (1)$$

$$C_b = 22.9A_{645} - 4.68A_{663} \quad (2)$$

1.4 叶绿素荧光参数的测定

用浮游植物调制荧光仪 PHYTOPAM 和带数据获得软件(PhytoWin)的计算机连体测定^[13]。取少量待测藻体置于暗盒内,对藻体进行 5 min 暗适应,然后打开 Phyto-PAM 调制脉冲荧光仪波长为 520 nm,强度为 $0.1 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的绿色检测光。测量过程由 PhytoWin 软件控制,开启测量光(ML),待光信号稳定后打开饱和脉冲键,记下 F_v/F_m 值。再打开光化光,部分电子门处于开放态,5 min 后给出一个饱和脉冲,此时得到当前光照状态下 PS II 的实际量子产量 Yield。

1.5 光合放氧速率的测定

为了研究不同浓度次氯酸钠处理的扁浒苔光合速率随时间的变化情况,本实验以低浓度 NaClO 溶液为介质进行实验,取 0.05 g(FW)新鲜扁浒苔于 20 °C 样品池,通过液相氧电极 Oxygraph (Hansatech)测定其光合放氧速率,反应介质为不同浓度 NaClO 溶液(10.0、20.0、40.0、60.0、80.0、100.0 $\mu\text{mol}/\text{L}$)光照强度选择浒苔叶状体饱和光强 $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。光合速率表示为每单位鲜重藻体的放氧速率 $\text{nmol O}_2/(\text{min} \cdot \text{g})$ 。

2 结果

2.1 色素吸收光谱

图 1 为扁浒苔样品提取色素的吸收光谱,叶绿素 a 的最大吸收波长在 436 nm 和 663 nm,叶绿素 b 的最大吸收波长在 463 nm 和 645 nm。如图所示,提取的浒苔色素样品的最大发射波长在 680 nm 处。由此可见,紫菜养殖海区的扁浒苔含有正常的叶绿素 a 和叶绿素 b。

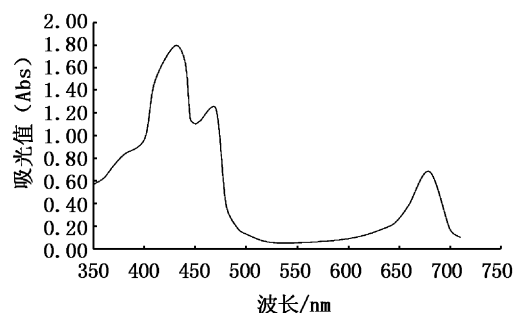


图 1 扁浒苔提取色素的可见光吸收光谱

Fig. 1 The absorption spectra of the chlorophyll extracted from *U. compressa*

2.2 不同浓度 NaClO 对扁浒苔叶绿素含量的影响

图 2 为 NaClO 处理前后扁浒苔细胞状态的对比,可看到经次氯酸钠处理的藻体细胞明显变形,并由绿色褪为黄绿色;从表 1 可知,经 NaClO 溶液浸泡后,扁浒苔叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均呈下降趋势,这进一步证明了图 2 中细胞褪色是由于叶绿体受到损伤。2.00 mmol/L 的 NaClO 溶液处理就能使藻体叶绿素含量明显减少,且随 NaClO 浓度升高,Chl. a、Chl. b 含量及 Chl. a/Chl. b 值均呈递减趋势,其中 10 mmol/L 实验组扁

浒苔的叶绿素 a 较空白组下降了 91.10%, 而叶绿素 b 下降了 79.69%。

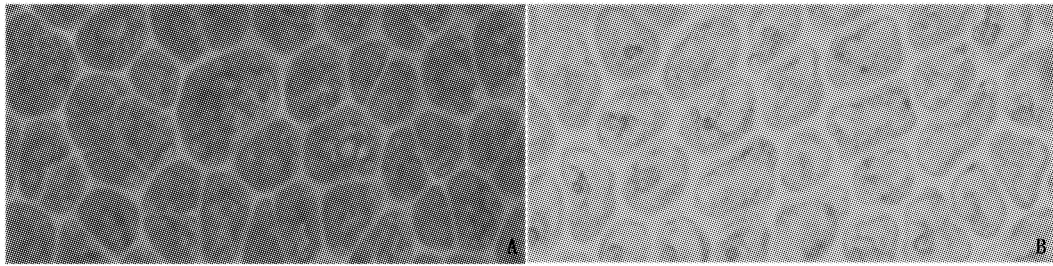


图 2 NaClO 处理前后细胞状态比较

Fig. 2 Cell survival of *U. compressa* after NaClO treatment

A. 处理前; B. 处理后。

表 1 不同浓度 NaClO 处理后扁浒苔叶绿素含量的变化

Tab. 1 Change of chlorophyll content after different concentration NaClO treatment

NaClO 浓度 / (mmol/L)	Chl. a / (mg/g)	Chl. b / (mg/g)	Chl. a/Chl. b
0	0.337 ± 0.014	0.192 ± 0.009	1.75 ± 0.028
2.00	0.206 ± 0.004	0.136 ± 0.005	1.52 ± 0.077
4.00	0.125 ± 0.007	0.115 ± 0.006	1.09 ± 0.059
6.00	0.106 ± 0.011	0.114 ± 0.006	0.93 ± 0.141
8.00	0.054 ± 0.006	0.066 ± 0.003	0.82 ± 0.061
10.00	0.030 ± 0.001	0.039 ± 0.004	0.77 ± 0.058

2.3 不同浓度 NaClO 对扁浒苔荧光参数的影响

由图 3 可知, 叶绿素荧光参数最大光量子产量 F_v/F_m 和实际光量子产量 Y_{eild} 随着 NaClO 浓度的升高呈逐渐递减的趋势, 对照组藻体的荧光参数 F_v/F_m 值可达 0.64, 4.00 mmol/L 实验组藻体的 F_v/F_m 已降至 0.1, 10.0 mmol/L 处理后已测不到藻体的荧光参数。

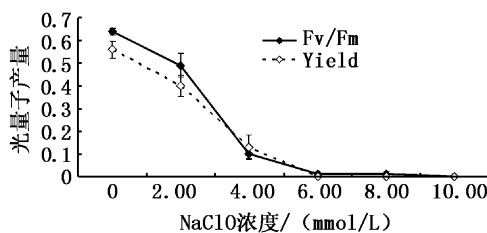


图 3 不同浓度 NaClO 处理后扁浒苔藻体叶绿素荧光特性的比较

Fig. 3 Comparison of fluorescence characteristics of *U. compressa* after NaClO treatment

2.4 不同浓度 NaClO 对扁浒苔光合速率的影响

氧电极是通过测定放氧量来反映植物的光合速率, 能够直接、准确地反映植物的光合规律, 客观性要远好于传统的光合仪测定方法。图 4 为不同浓度 NaClO 处理后扁浒苔的光合速率与反应时间之间的关系, 可以看出, 除了有效氯含

量为 10.0 $\mu\text{mol/L}$ 处理组藻体的光合速率在 3 ~ 19 min 基本不变外, 其他实验组藻体的光合速率均随时间的延长而降低, 其中 80.0 $\mu\text{mol/L}$ 和 100.0 $\mu\text{mol/L}$ 最为明显, 自 7 min 开始这两组扁浒苔的放氧速率已为负值。

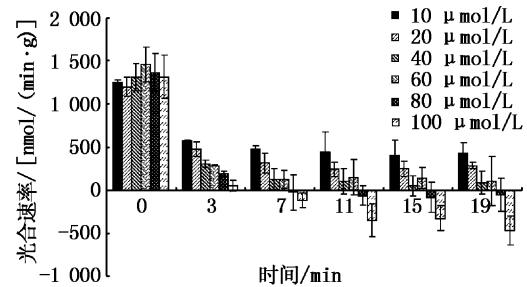


图 4 加入不同浓度 NaClO 后时间-光合速率关系
Fig. 4 Relationship of time-photosynthetic rate with different concentration NaClO treatment

以 3 min 时藻体的光合速率为例(图 5), 可看出扁浒苔经 NaClO 处理后, 藻体的光合放氧速率明显降低且随 NaClO 浓度的升高呈递减趋势, 10.0 $\mu\text{mol/L}$ 的 NaClO 就能使健康藻体的光合放氧速率由 1300 $\text{nmol O}_2 / (\text{min} \cdot \text{g})$ 降至 570 $\text{nmol O}_2 / (\text{min} \cdot \text{g})$, 10.0 ~ 100 $\mu\text{mol/L}$ 浓度区间藻体的光合速率下降至实验前的 3.85% ~ 4.28%。

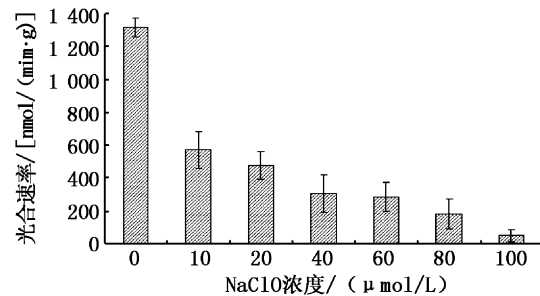


图 5 加入不同浓度 NaClO 3 min 后扁浒苔光合速率的变化

Fig. 5 The change of photosynthetic rate after 3 min of different concentration NaClO treatment

3 讨论

近年来有关 NaClO 对微藻生长影响的研究较多,如许龙杰^[14]研究了次氯酸钠在不同浓度和不同 pH 条件下对羊角月牙藻的杀灭效果,结果表明次氯酸钠浓度越高,叶绿素的褪色效果越明显,但细胞减少量并不显著,且叶绿素褪色率不同的藻液经离心后重新接种到新鲜培养基中,藻细胞的数量逐渐下降。乔俊莲^[15]等研究了 NaClO 在藻类处理过程中藻毒素释放和降解的特性,结果显示 NaClO 作用于藻细胞后会破坏其完整性,导致藻毒素释放,同时次氯酸钠投加量对藻毒素释放及降解量有较大影响。但目前关于 NaClO 对大型藻类杀灭的研究还不多见,本实验选用江苏沿岸紫菜养殖区绿藻构成种扁浒苔进行研究,结果表明较低浓度的 NaClO 就可以引起藻体中叶绿素含量的较大幅度降低。

光合色素的含量是衡量植物光合性能的重要指标之一,它影响植物对光能的吸收、传递以及在 PS II 和 PS I 之间分配和转换合成 ATP 与 NADPH 的量^[16],从而影响植物的光合效率和养分的积累^[17],叶绿素含量的减少意味着藻体光合能力的降低,这直接影响到藻体的正常生长,有研究利用叶绿素 a 褪色率、细胞数作为 NaClO 对羊角月牙藻杀灭效果的评价标准^[14],还有文献以叶绿素 a 为指标监测水中藻类的去除率^[18]。一般来说可用 Chl. a/Chl. b 的值来反映 PS II 聚光复合体(LHC II)在所有含叶绿素的结构中所占的比重,海洋绿藻的 Chl. a/Chl. b 约为 1.0 ~ 2.3^[19],该值降低是 LHC II 含量增加的主要特征^[20]。本实验中,随着 NaClO 浓度的增加,该值呈现降低的趋势,10 mmol/L 组藻体的 Chl. a/Chl. b 甚至低至 0.77,这说明扁浒苔在遭受胁迫时,保护 LHC II 的能力提高了,尽可能地捕获光能,吸收更多光能用于光合作用。

叶绿素荧光是光合作用的探针,通过荧光参数分析可以了解光合机构内部一系列重要的调节过程,并且几乎所有光合作用过程的变化都可以通过研究叶绿素荧光反映出来^[21],利用叶绿素荧光测定仪可以在不损伤藻体的情况下,通过对叶绿素荧光参数的分析,研究外界条件变化对藻体生长和光合作用的影响^[22]。Fv/Fm 代表 PS II 的潜在最大量子产量,它反映的是当所有 PS II 反

应中心均处于开放态时的量子产量,表示光反应中心原初光能转化效率^[23-24],即潜在最大光合能力,且在正常生理状态下,Fv/Fm 是一个很稳定的值,藻类的该值约为 0.65^[25]。当受到胁迫时,光系统会受到不同程度的损伤,从而造成光合能力的下降,因此,Fv/Fm 是度量光抑制或各种环境胁迫对光合作用影响的重要指标^[26],本实验对经 NaClO 溶液处理的扁浒苔叶绿素荧光活性进行测定,结果显示实验组藻体的 Fv/Fm 值明显低于空白组藻体,且随 NaClO 浓度升高呈降低趋势。当 NaClO 的浓度升高到 10 mmol/L 时,虽然还可提取到微量的叶绿素,但已基本测不到叶绿素的荧光活性,这可能是由于 NaClO 对藻体的胁迫使 PS II 的活性中心遭到破坏,降低了 PS II 原初光能转化效率^[27],但 LHC II 尚有部分活性。也有研究表明强氧化剂影响藻类生长是由于活性氧(ROS)水平升高,植物体内过度累积 ROS 会导致生物大分子和膜系统的破坏^[28],而进行光化学反应和电子传递的各种组分多位于叶绿体内的类囊体膜上^[29],所以藻体光合活性减弱可能是由于氧化胁迫导致过度累积的 ROS 无法被及时清除,最终导致光合系统受损。

绿藻滋生是紫菜生产中相当棘手的问题。育苗期,紫菜丝状体在贝壳内生长,这时有少部分单细胞绿藻也能钻入贝壳与紫菜同步生长;至秋末初冬,紫菜叶状体在网帘上生长,绿藻也可以附着于网帘,有时甚至覆盖住紫菜,导致成片网帘失收,严重影响紫菜产量及品质^[30]。目前,在紫菜育苗、采苗、放网这段紫菜生长的早期阶段,均有相应的绿藻清除方法^[31]:干燥法、柠檬酸/盐酸浸泡法、冷藏网技术;但是在紫菜长成成体后,部分网帘尚有绿藻残留,此时绿藻也生长到一定大小(1 cm 以上),上述处理方法便不可行了,若残留的绿藻与紫菜同时被收割,便会大大影响紫菜品级,所以如何清除紫菜生长后期网帘上的绿藻是一个关键问题。有关文献研究了多种大型海藻对氧化胁迫的影响^[28],结果显示,经氧化处理后,红藻 Fv/Fm 只下降了 20%,而绿藻的 Fv/Fm 下降了 60%,说明红藻的抗氧化性远强于绿藻。本实验以 NaClO 作为受试药品,研究了其对扁浒苔的去除效果。NaClO 的杀藻灭菌原理主要是通过水解形成次氯酸,次氯酸再进一步分解形成新生态氧[O],[O]极强的氧化性可使菌

体和藻细胞内的蛋白质变性,从而使菌体和藻细胞死亡^[14]。所以只要控制好 NaClO 的用量,便能在不影响紫菜正常生长的同时杀灭绿藻。而且 NaClO 化学性质极不稳定,在光照条件下容易分解,其分解产物主要是 NaCl、NaClO₃ 和氯化氢气体等,这些都是海水的组成成分。目前,很多研究都集中在如何提高 NaClO 溶液的稳定性方面^[32-35],但正是由于它不稳定的特性能够防止其在实际生产应用中的扩散问题,降低或消除了清除绿藻过程中 NaClO 对紫菜和环境造成的影响。根据有关次氯酸钠稳定性的研究,温度对次氯酸钠稳定性有很大影响^[36],随着温度变高,次氯酸钠分解加快;pH 对次氯酸钠溶液的分解速率也有一定影响^[37],当溶液的 pH 较低时,分解比较快,而当 pH 大于 12 时,次氯酸钠分解较慢,故在运用到实践中时,使用 pH 较低的溶液,并且较高的光照强度可能也会加快次氯酸钠的分解^[38]。

课题组曾在如东紫菜养殖海区进行过小规模实地预实验,采用 4.2、5.6、7.0 mmol/L 3 个浓度梯度,7.0 mmol/L 的 NaClO 溶液处理 30 min 左右可使网帘上的绿藻褪色变白死亡,4.2 和 5.6 mmol/L 的 NaClO 溶液处理后,网帘上的绿藻散发出浓烈的青苔味,部分藻体有褪色发黄的现象,3 d 后观察发现:4.2 和 5.6 mmol/L 浓度处理的网帘,附着其上的绿藻消失,说明 4.2 mmol/L 浓度的 NaClO 已经破坏了绿藻细胞的连接能力,在潮汐作用的影响下断裂,从而达到清除绿藻的目的。笔者认为综合运用紫菜生长早期清除绿藻的干燥法和冷藏网法,结合可用于紫菜生长中后期的 NaClO 法,将会使紫菜产业的绿藻问题更大程度上得到解决。但该方法要运用到实际生产中还有许多需要进一步探讨的问题,比如如何解决 NaClO 在运输过程中的稳定性与施用后分解性的矛盾、NaClO 的用法用量、紫菜的产量和质量等。

参考文献:

- [1] 王超,乔洪金,潘光华,等. 青岛奥帆基地海域漂浮浒苔光合生理特点研究[J]. 海洋科学,2008,32(8):13-15.
- [2] 田晓玲,霍元子,陈丽平,等. 江苏如东近海绿潮藻分子检测与类群演替分析[J]. 科学通报,2011,56(4/5):309-317.
- [3] OWENSA N J P, STEWART W D P. *Enteromorpha* and the cycling of nitrogen in a small estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1983, 17(3): 287-296.
- [4] PANG S J, LIU F, SHAN T F, et al. Tracking the algal origin of the *Ulva bloom* in the Yellow Sea by a combination of molecular, morphological and physiological analyses[J]. Marine environmental research, 2010, 69(4): 207-215.
- [5] WANG J F, JIANG P, CUI Y L, et al. Molecular analysis of green-tide-forming macroalgae in the Yellow Sea[J]. Aquatic Botany, 2010, 93(1): 25-31.
- [6] 施敏健,王惠冲. 条斑紫菜人工育苗期绿藻的预防[J]. 海洋渔业,1995, 17(2):82,93.
- [7] 施敏健,王惠冲. 条斑紫菜人工育苗期预防绿藻的方法[J]. 水产养殖,1996(2):10-11.
- [8] 马德坪,苏瑜,薛仲华. 次氯酸钠水溶液分解动力学研究[J]. 上海工程技术大学学报,2002,16(1):8-10.
- [9] 张大丽,余国忠. 次氯酸钠/过氧化氢法处理含铜绿微囊藻原水[J]. 河南大学学报:自然科学版,2007,37(3):245-248.
- [10] 王军,王笑月. 次氯酸钠对金藻及其中的扁甲藻的处理效果[J]. 水产科学,1997,16(2):28-30.
- [11] 孙修涛,王翔宇,汪文俊,等. 绿潮中浒苔的抗逆能力和药物灭杀效果初探[J]. 海洋水产研究,2008,29(5):130-136.
- [12] ARNON D I. Cooper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta Vulgaris* [J]. Plant Physiol, 1949, 24(1): 1-15.
- [13] GERA A, ALCOVERRO T, MASCARO O, et al. Exploring the utility of *Posidonia oceanica* chlorophyll fluorescence as an indicator of water quality within the European Water Framework Directive [J]. Environmental monitoring and assessment, 2012, 184(6): 3675-3686.
- [14] 许杰龙,任随周,张国霞,等. pH 及浓度对次氯酸钠除藻效果的影响[J]. 安徽农业科学,2011,39(17):10353-10355.
- [15] 乔俊莲,董磊,董敏殷,等. 次氯酸钠对微囊藻毒素释放及降解特性的研究[J]. 供水技术,2009,3(4):11-13.
- [16] 陈屏昭,罗家刚,王磊,等. 亚硫酸氢钠影响脐橙叶片光合作用的原因[J]. 西北农业学报,2004,13(1):69-75.
- [17] LICHTENTHALER H K, AC A, MAREK M V, et al. Differences in pigment composition, photosynthetic rates and chlorophyll fluorescence images of sun and shade leaves of four tree species [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2007, 45(8): 577-588.
- [18] 赵玉华,薛飞,傅金祥,等. 化学氧化法除藻的试验[J]. 沈阳建筑工程学院学报:自然科学版,2006,22(5):829-832.
- [19] ROWAN K S. Phtotsynthetic pigments of algae[M]. CUP Archive, 1989.
- [20] 冯永军,史宝胜,董桂敏,等. 叶绿素荧光动力学在植物抗逆性及水果保鲜中的应用[J]. 河北农业大学学报,2003, 26(s1):89-92.
- [21] SCHREIBER U, BILGER W, NEUBAUER C. Chlorophyll

- fluorescence as a non-intrusive indicator for rapid assessment of in vivo Photosynthesis [M]. Ecophysiology of Photosynthesis, Ecological Studies. Berlin: Springer-Verlag, 1994: 49 - 70.
- [22] SCHREIBER U. Pulse-amplitude-modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method; an overview [M]. Chlorophyll a Fluorescent. Springer Netherlands, 2004: 279 - 319.
- [23] GUO D P, GUO Y P, ZHAO J P, et al. Photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in leaves of stem mustard (*Brassica juncea var. tsatsai*) after turnip mosaic virus infection [J]. Plant Science, 2005, 168(1): 57 - 63.
- [24] GENTY B, BRIANTAIS J M, BAKER N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence [J]. Biochimica et Biophysica Acta-General Subjects, 1989, 990(1): 87 - 92.
- [25] BISCHOF K, HANELT D, WIENCKE C. UV-radiation can affect depth-zonation of Antarctic macroalgae [J]. Marine Biology, 1998, 131(4): 597 - 605.
- [26] LIMA J D, MOSQUIM P R, DA MATTA F M. Leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in *Phaseolus Vulgaris* as affected by nitrogen and phosphorus deficiency [J]. Photosynthetica, 1999, 37(1): 113 - 121.
- [27] 杨晓青, 张岁岐, 梁宗锁, 等. 水分胁迫对不同抗旱类型冬小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响 [J]. 西北植物学报, 2004, 24(5): 812 - 816.
- [28] DUMMERMUTH A L, KARSTEN U, FISCH K M, et al. Responses of marine macroalgae to hydrogen-peroxide stress [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2003, 289(1): 103 - 121.
- [29] 韩博平, 韩志国, 付翔, 等. 藻类光合作用机理与模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 3 - 4.
- [30] 王惠冲. 紫菜养殖中绿藻的综合防治 [J]. 水产养殖, 1992, (1): 5.
- [31] 徐丽宁, 杨锐. 紫菜病害及防治 [J]. 水利渔业, 2005, 25(6): 103 - 105.
- [32] 王万林. 次氯酸钠溶液稳定性研究进展 [J]. 无机盐工业, 2007, 39(9): 12 - 14.
- [33] 杨志祥, 王军明, 牛俊峰, 等. 次氯酸钠水溶液体系稳定性研究 [J]. 浙江科技学院学报, 2007, 19(3): 202 - 204.
- [34] 盛梅, 马芬, 杨文伟. 次氯酸钠溶液稳定性研究 [J]. 化工技术与开发, 2005, 34(3): 8 - 10.
- [35] 黄耀威. 次氯酸钠溶液的分解特性及新型稳定剂的研究 [D]. 广东: 广州工业大学, 2008: 16 - 17.
- [36] SIRTES G, WALTIMO T, SCHAEITZLE M, et al. The effects of temperature on sodium hypochlorite short-term stability, pulp dissolution capacity, and antimicrobial efficacy [J]. Journal of Endodontics, 2005, 31(9): 669 - 671.
- [37] CHRISTENSEN C E, MCNEAL S F, ELEAZER P. Effect of lowering the pH of sodium hypochlorite on dissolving tissue in vitro [J]. Journal of Endodontics, 2008, 34(4): 449 - 452.
- [38] FRAIS S, NG Y L, GULABIVALA K. Some factors affecting the concentration of available chlorine in commercial sources of sodium hypochlorite [J]. International endodontic journal, 2001, 34(3): 206 - 215.

Effects of sodium hypochlorite on chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic rate of *Ulva compressa*

ZHU Ying^{1,2}, ZHANG Jian-heng^{1,2}, HUA Liang^{1,2}, HE Pei-min^{1,2}, QU Xian-cheng¹, YU Ke-feng^{1,2}

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Institute of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This paper used *Ulva compressa* which is the composing species of green algae communities in Rudong seaweed farming sea area for investigation. Experiments studied the effects of sodium hypochlorite on chlorophyll composition, fluorescence characteristics and photosynthetic rate of *U. compressa* by chlorophyll extract, chlorophyll fluorescence technology and liquid oxygen electrode. The results showed that with the NaClO concentration increasing, the chlorophyll content and fluorescence characteristics of *U. compressa* were gradually decreasing. After 10.0 mmol/L NaClO treatment, Chl. *a* and Chl. *b* respectively reduced to 0.030 mg/g and 0.039 mg/g; 0.00 – 6.00 mmol/L NaClO have significant influence on the fluorescence characteristics of the algae; 10.0 – 100 μ mol/L NaClO can make the photosynthetic rate of *U. compressa* decline significantly in 3 min, in which 100 μ mol/L group declined from the control group of 1315 nmol O₂/(min · g) to -472 nmol O₂/(min · g). According to the experiments and verification in aquaculture area, 4.0 mmol/L NaClO could be regarded as an ideal reagent in green algae removing.

Key words: *Ulva compressa*; sodium hypochlorite; chlorophyll fluorescence; photosynthetic rate