

菊花心江蓠的光合特性及其应用研究

汤坤贤¹, 林泗彬², 汤朴毅³, 陈玉珍¹, 陈敏儿², 林亚森², 孙元敏¹, 蔡鹭春¹

(1. 国家海洋局第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2. 东山县环境监测站, 福建 东山 363400;

3. 上海海洋大学, 上海 201306)

摘要:测定不同光强下菊花心江蓠(*Gracilaria lichevodes*)的产氧率和耗氧率. 结果表明, 20 000 lx 以内菊花心江蓠的产氧率和光强的相关曲线的回归方程为 $y = 0.000\ 144\ 3x - 0.122\ 1$, $R^2 = 0.993\ 8$, 实验条件下菊花心江蓠的耗氧率为 $0.121 \pm 0.010\ \text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$, 光补偿点为 825 lx, 光饱和点在 20 000 ~ 22 000 lx 之间, 光饱和时的产氧率为 $2.723 \pm 0.329\ \text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$. 光饱和以后菊花心江蓠的产氧率基本保持不变, 45 000 lx 以后出现轻微光抑制现象. 测量水下光强随水深变化情况, 发现水深达到水体透明度深度时, 光强约 14 000 ~ 15 000 lx, 与菊花心江蓠的最大生长率的光强接近. 测量不同养殖模式的溶解氧浓度昼夜变化, 发现养殖密度过大可能在凌晨出现缺氧状态. 根据菊花心江蓠的光合特性, 提出江蓠养殖、江蓠用于生态修复的水深调控方法以及江蓠用于生态养殖的密度调控方法, 以保持不同需求条件下较高的经济或生态效益.

关键词:海洋生物学; 菊花心江蓠; 光合特性; 养殖; 生态修复

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2018. 04. 009

中图分类号: P735

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2018)04-0534-07

菊花心江蓠(*Gracilaria lichevodes*)原产于台湾, 1998 年移植福建省东山县, 逐渐在福建、广东沿海推广. 生长季节主要是每年的 5 ~ 11 月, 主要在池塘中养殖, 适宜生长的盐度为 20 ~ 32, 温度为 20 ~ 34℃. 菊花心江蓠是夏季鲍最主要的新鲜饵料, 具有良好的经济价值. 同时, 江蓠可以有效地吸收海水中的无机氮(DIN)、无机磷(DIP), 通过光合作用产生氧, 最终通过收获海藻彻底去除海水中的营养物质, 防治海水富营养化, 改善养殖环境, 修复养殖功能退化的海洋环境, 减少赤潮的发生与危害^[1-3]. 而江蓠的光合特性研究是江蓠在养殖、生物修复和赤潮防治等方面应用的重要依据.

关于江蓠的光合作用研究, 刘思俭等(1982、1985)研究了细基江蓠繁枝变种(*G. tenuistipitata* var. *liui*)在不同水层中的光合作用与生长, 以及不同光照强度对细基江蓠繁枝变种光合作用的影响^[4-5]. 毛玉泽等(2006)研究了不同温度、光照条件下龙须菜(*G. lemaneiformis*)的生长和光合作用特性^[6]. 卢晓等(2014)^[7]、钟志海等(2014)^[8]研究了光照、温度等条件对脆江蓠(*G. chouae*)和异枝江蓠

(*G. bailinae*)生长的影响. 但菊花心江蓠的光合作用特性研究国内外未见报道, 也未见利用菊花心江蓠光合特性在江蓠养殖和生态修复方面应用的报道. 本研究测定了菊花心江蓠的耗氧率、光补偿点、光饱和点、不同光强下的产氧率与生长率等, 根据江蓠的光合特性提出江蓠在养殖、生态修复、生态养殖应用中的水深和密度调控措施, 为成果推广应用提供可靠的基础数据与参考.

1 材料与方法

1.1 实验设计

1.1.1 江蓠采集与选取 菊花心江蓠采自东山县的江蓠养殖场. 采集后去除杂物, 用过滤海水洗净, 在相同的实验条件下培养于玻璃瓶中备用.

1.1.2 江蓠产氧率测定 使用黑白瓶法测定江蓠产氧率. 光强小于 10 000 lx 在实验室内以日光灯为光源, 光强大于 10 000 lx 在室外以太阳光为光源. 室内温度控制在 $25 \pm 2^\circ\text{C}$, 室外实验水温为 25 ~ 32℃. 实验用水为采自自然海区经砂滤后的海水, 临用前用蒸馏水调节盐度至 30. 室内实验: 取 $10\ \text{dm}^3$

玻璃瓶 5 个,编号分别为 A、B、C、D、E,分别放入新鲜菊花心江蕨 2.045、3.014、3.938、4.872、5.000 g. 瓶子装满盐度 30 的海水后,用液体石蜡封盖水面. A、B、C、D 为白瓶,以日光灯为光源,光强 4 500 lx;E 为黑瓶,用黑布包裹置于暗箱;另取 1 个瓶子不放江蕨作空白对照实验(control),实验条件同白瓶. 白天每隔 0.5~1.0 h 测定白瓶的光强、水温、DO 浓度、DO 饱和度. 实验前后测定黑瓶 E 和 control 的水温、DO 浓度、DO 饱和度.

根据上述实验结果,取菊花心江蕨约 5 g,调节日光灯的数量和白瓶与光源的距离,分别在 250、500、750、1 000、1 500、2 000、3 000、4 000、5 000、8 000、10 000 lx 等光强下,用上述方法测量瓶中 DO 浓度变化,光照时间 12 h,每组至少 3 次重复.

室外实验:取 10 dm³玻璃瓶 4 个,编号分别为 1、2、3、4;每个瓶中各放新鲜菊花心江蕨 2 g. 瓶子装满盐度 30 的海水后,用液体石蜡封盖水面,浸于水中,防止阳光下水温上升太高. 1 受阳光直射;2、3、4 的上方分别遮 2、4、8 层的白纱布. 光照期间一般每隔 1 h 测定白瓶的光强、水温、DO 浓度、DO 饱和度.

1.1.3 不同水深的光强测量 测量自然海区和养鱼池塘的透明度. 将照度计的光检测器固定在透明度盘上,将透明度盘缓缓放入水中并保持水平状态,读取水中不同深度的光强,重复 3 次.

1.1.4 不同养殖模式的 DO 浓度变化实验 连续 24 h,每隔 1 h 测量江蕨养殖池、对虾养殖池、江蕨与对虾混养池的 DO 浓度. 江蕨养殖池与混养池的菊花心江蕨养殖密度约 12 t/hm²;斑节对虾(*Penaeus monodon*)长度约 12 cm,养殖密度约为 1.8×10⁴ 个/hm². 养殖池塘均为面积 0.53 hm²,水深约 0.5 m. 监测期间白天为晴天.

1.2 分析方法

温度、pH 值、DO 浓度、DO 饱和度用德国 WTW 公司制造的 P4 多参数计现场测定. 光强采用照度计测定.

1.3 数据处理

1.3.1 产氧率的计算方法 江蕨的产氧率(v ,mg/(g·h))按以下公式计算:

$$v = (C_t - C_0) V / (G \cdot t) \tag{1}$$

式(1)中: C_t 为实验结束时 DO 浓度(mg/dm³), C_0 为实验开始时 DO 浓度(mg/dm³), V 为水样体积(dm³), G 为江蕨重量(g), t 为实验的光照时间(h),江蕨耗氧率的计算方法同产氧率.

1.3.2 生长率及计算方法 测定 DO 浓度的同时,

称量实验前后的江蕨重量,根据称量结果按以下公式计算江蕨平均日生长率(SGR ,%):

$$SGR = [(W_2 / W_1)^{1/(t_2 - t_1)} - 1] \times 100 \tag{2}$$

式(2)中: t_2 、 t_1 为实验的第 t_2 、 t_1 天, W_2 、 W_1 分别为 t_2 、 t_1 时的江蕨鲜重(g).

实验时间与“1.1.2”一致,实验用水的 DIN 浓度为 0.3~0.5 mg/dm³,DIP 浓度为 0.03~0.05 mg/dm³之间,与正常养殖区的水质接近,实验结束时仍保持较高的营养盐浓度.

2 结果与讨论

2.1 室内实验的江蕨产氧率

图 1 是菊花心江蕨 24 h 内黑白瓶 DO 浓度变化,江蕨重量越大 DO 曲线的斜率也越大,但曲线后段由于 DO 饱和度较高,有少量氧形成气泡逸出,曲线的斜率稍微下降. 因此,本次实验白瓶的数据采用前 12 h 的数据. 黑瓶 24 h 内 DO 浓度下降了 1.21 mg/dm³,多次重复实验的菊花心江蕨平均耗氧率为 0.121±0.010 mg/(g·h),远小于正常光照情况下的产氧率. Control 在 24 h 内 DO 浓度下降了 0.12 mg/dm³,单位时间下降量为 0.005 mg/(dm³·h),远小于江蕨的产氧率,可以忽略不计. 因此,本实验的江蕨产氧率未做空白校正,也未用耗氧率进行进一步修正为真实产氧率,其结果代表江蕨的净产氧率,直接以实验结果计.

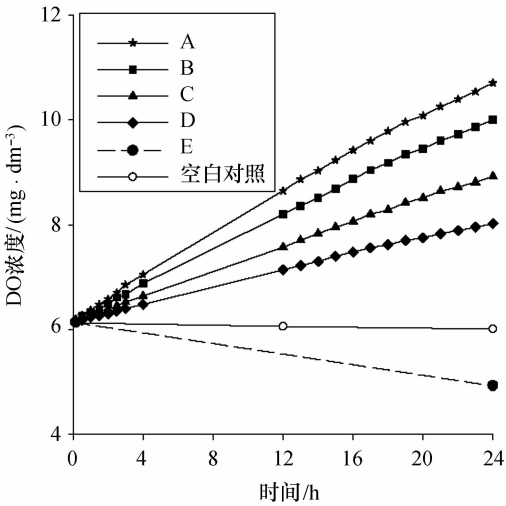


图 1 黑白瓶 DO 浓度随时间的变化曲线
Fig.1 Time series of DO concentrations
in light-dark bottles

2.2 室外实验的江蕨产氧率

图 2 是菊花心江蕨室外实验的 DO 浓度随光强变化情况. 1 代表当天的阳光光强变化情况;2 的光

强约为 1 的 1/2,3 的光强约为 1 的 1/3,4 的光强约为 1 的 1/5. 1 的 DO 初始浓度较其它的微高,并在前 4 h 内维持最高,但光强较小的 2、3,午后 DO 浓度上升较快,接近或超过 1. 而光强最小的 4 的 DO 浓度一直最低. 光强较大的 1、2 在中午阳光最强的时候,单位时间的 DO 浓度增量有所下降,而阳光被大部分遮挡的 4 则在这段时间 DO 浓度增量达到最大值. 说明菊花心江蓠在强光下表现出一定的光抑制现象.

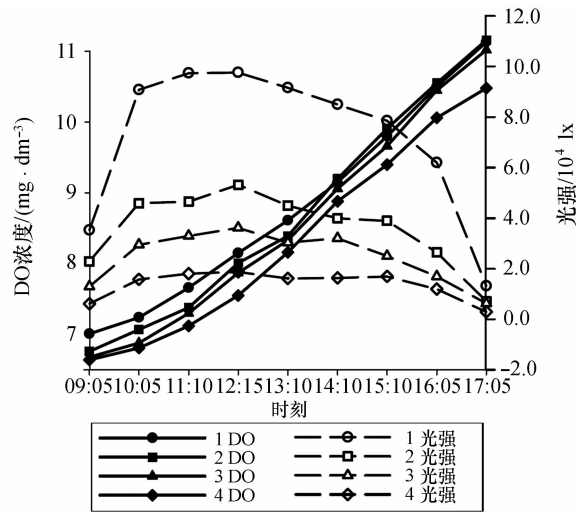


图2 菊花心江蓠光强、DO 浓度随时间的变化曲线

Fig. 2 Time series of light intensities and DO concentrations of *G. licheoides*

2.3 室内实验的光合作用曲线与光补偿点

根据室内实验数据的处理结果绘制光强 10 000 lx 以内菊花心江蓠的光合作用曲线(图 3). 光强小于 10 000 lx 时,江蓠的产氧率随光强的增大而增大,二者之间有良好的线性相关关系,回归方程为: $y = 0.000\ 144\ 3x - 0.122\ 1$, $R^2 = 0.993\ 8$. 实测结果的菊花心江蓠的光合补偿点为 825 lx,根据回归方程的计算结果的光补偿点 846 lx,二者基本吻合.

2.4 江蓠的光合作用曲线与光饱和点

根据实验室和室外的实验数据处理结果,绘制光强在 0 ~ 80 000 lx 范围内完整的菊花心江蓠的光合作用曲线(图 4). 光限制阶段江蓠的产氧率与光强之间的相关曲线呈线性关系,江蓠的产氧率随光强的增大而增大,光合作用饱和点以后江蓠的产氧率不再随光强的增大而增大,菊花心江蓠的产氧率基本保持不变,在光强大于 45 000 lx 时开始下降. 光饱和时菊花心江蓠的产氧率约 2.723 ± 0.329 mg/(g·h).

根据回归方程的计算结果,菊花心江蓠的光饱和点为 19 700 lx,实验条件下菊花心江蓠的光饱和

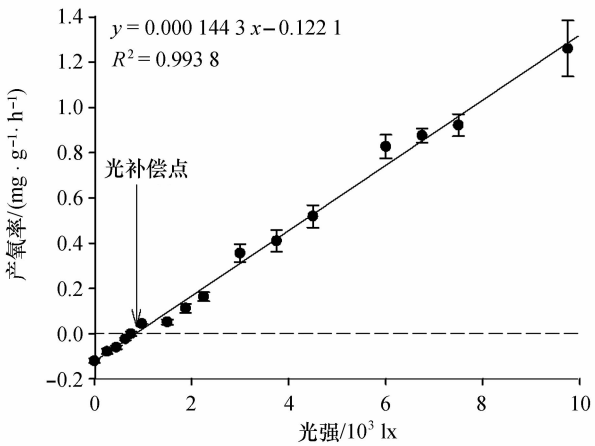


图3 菊花心江蓠的光合作用曲线(光强≤10 000 lx)

Fig. 3 Photosynthesis curve of *G. licheoides* (light intensity ≤ 10 000 lx)

点在 20 000 ~ 22 000 lx.

可见,菊花心江蓠的光合速率随光强的变化而变化. 从图 4 可以看出,光限制阶段,产氧率是光强的线性函数,江蓠的产氧率随光强的增大而增大;光饱和阶段,产氧率不随光强而变化,基本保持恒定;光强大于 45 000 lx 以后,表现出一定程度的光抑制现象.

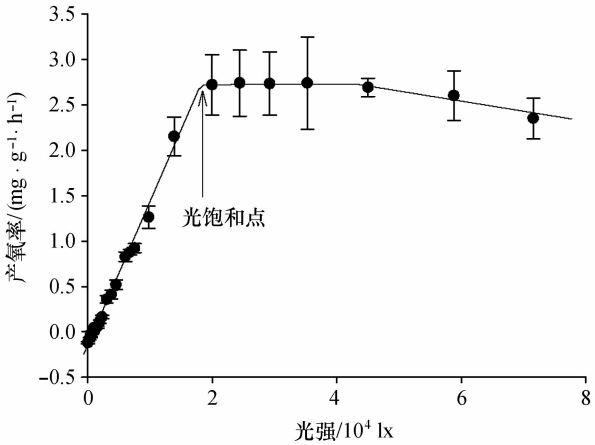


图4 菊花心江蓠的光合作用曲线

Fig. 4 Photosynthesis curve of *G. licheoides*

2.5 不同光强下江蓠的生长率

本研究未针对菊花心江蓠的生长率进行系统的实验. 根据上述产氧率实验前后的江蓠重量,总结了不同光强下的日平均生长率. 在盐度适宜营养充足的情况下,菊花心江蓠在 8 000 ~ 14 000 lx 光强范围内,能保持约 7.0% 的高生长率;在 24 700 ~ 36 300 lx 的光饱和阶段,大约保持 4.9% 的生长率;光强 4 500 ~ 6 000 lx 的生长率约 5.0% ~ 6.0%,光强 1 000 lx 的生长率约 3.0%;在 70 000 ~ 80 000 lx

的阳光直接照射情况下,尽管江蕨保持较大的 N、P 吸收速率,但生长处于停滞状态;黑暗条件下或光强低于 200 lx 时菊花心江蕨对 N、P 吸收速率接近 0,生长处于停滞状态^[9]. 可见,菊花心江蕨的最大生长率的光强低于光饱和点,从光强较弱的 4 500 lx 至很大的 36 300 lx 的宽广范围内,江蕨均能保持较大的生长率,光强太大或太小均不利于江蕨的生长,强光直接照射或黑暗条件下菊花心江蕨的生长基本处于停滞状态.

2.6 养殖池不同水深的光强

由于江蕨养殖池的水体透明度值大多大于水

深,无法测量透明度以下的水中光强,选择水体透明度较低的养鱼池塘和自然海区测量光强随水深的变化. 结果如图 5 所示,水面反射的光约占 30% ~ 40%,仅 60% ~ 70% 的光进入水中;进入水中后光强随水深增加逐渐减弱,当水深达到水体透明度时,光强约 14 000 ~ 15 000 lx;透明度水层以下的水体,仍然保持一定的光强,随水深增加光强逐渐减小. 不同透明度的水体,透明度越大,水底光强也越大. 另据现场测定,夏季晴天野外光强一般大于 80 000 lx,阴到多云的天气光强约 40 000 lx.

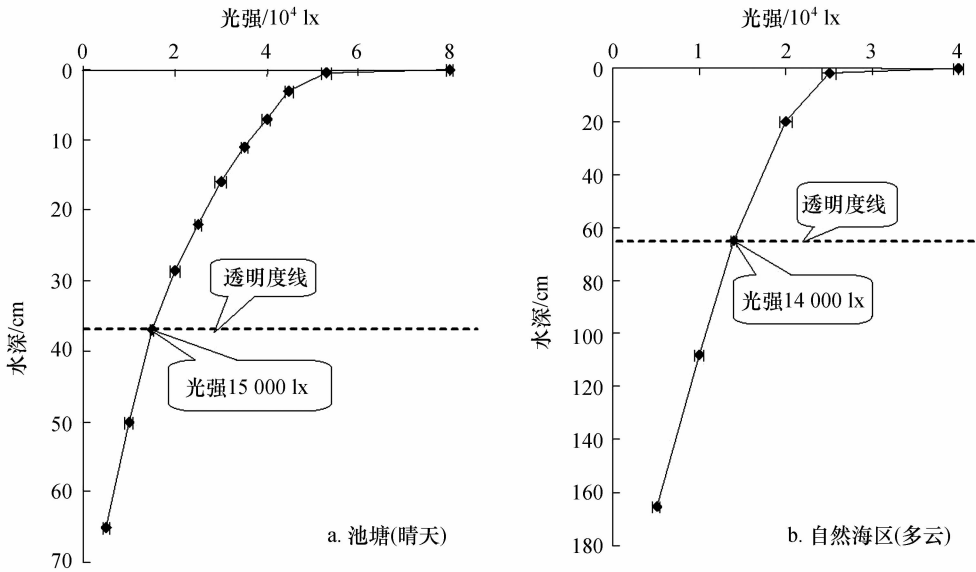


图 5 水中光强随水深的变化曲线
Fig. 5 Variations of light intensities with water depths

2.7 不同养殖模式的昼夜 DO 浓度变化

图 6 是单养江蕨、单参对虾以及对虾和江蕨混养的 3 种养殖模式的养殖池 DO 浓度变化情况,Chl-*a* 浓度均 3 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ 左右. 结果表明,对虾养殖池 DO 浓度低且变化幅度小;混养池的 DO 浓度明显高于对虾养殖池,且午后升幅较大,DO 浓度的波动幅度也大,约 16:00 以后 DO 浓度逐渐下降,进入夜间 DO 浓度下降幅度最大,浓度最低,2:00—3:00 的换水缓解了 DO 浓度的下降,换水后 DO 浓度继续下降,凌晨达到最小值;江蕨养殖池的 DO 浓度与混养池的 DO 浓度变化趋势基本一致,但夜间单养江蕨的 DO 浓度下降幅度较小,凌晨时的最小值也比混养池大. 总体上,各养殖池白天 DO 浓度逐渐上升,约 16:00 达到最大值,然后逐渐下降,凌晨处于最低值,生物量最大的混养池 DO 浓度最小,夜间换水可以减缓 DO 浓度下降幅度.

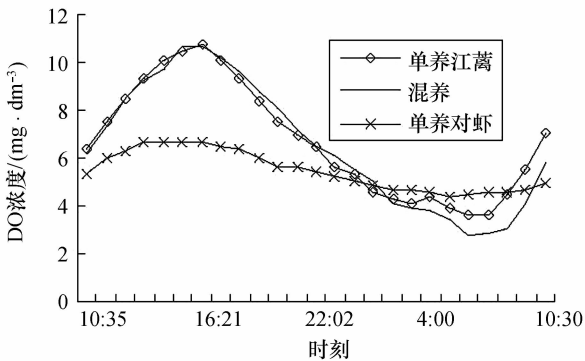


图 6 不同养殖池 24 h 的 DO 浓度变化曲线
Fig. 6 Diurnal variation of DO concentrations in different aquaculture ponds

2.8 讨论与应用

2.8.1 江蕨光合特性在江蕨养殖中的应用 光强太大或太小均不利于菊花心江蕨的生长,脆江蕨、异

枝江蓼也同样存在随光强增大生长率呈先上升后下降的趋势,最适宜的生长光强均为 $6\,000\text{ lx}$ ^[7-8],最大生长率和适宜生长光强均低于菊花心江蓼.从光强较弱的 $4\,500\text{ lx}$ 至很大的 $36\,300\text{ lx}$ 的宽广范围内,菊花心江蓼均能保持较大的生长率,不管阴雨天还是夏季阳光强烈的天气,在光强波动较大的范围内菊花心江蓼均能保持约 $5\% \sim 7\%$ 的较大生长率.但根据池塘养殖江蓼的产量推算,实际生产中菊花心江蓼的日平均生长率约 $2\% \sim 3\%$,甚至更低,水位控制不当可能是其中一个关键因素.

实际生产中,可以根据江蓼的光饱和点、补偿点和水体的透明度等调节适宜的养殖水深,保证江蓼处于良好的生长状态.一般养殖户根据养殖池的进排水条件和个人经验调节养殖水深,菊花心江蓼养殖池塘的水深大多为 $40 \sim 50\text{ cm}$,有的仅 $20 \sim 30\text{ cm}$,且不随天气变化做灵活调节.据实验结果,菊花心江蓼的光饱和点约 $20\,000 \sim 22\,000\text{ lx}$,最大生长速率的光强约 $14\,000\text{ lx}$,因此,江蓼养殖的水下光强应尽量保持在 $10\,000 \sim 20\,000\text{ lx}$ 之间.正常的菊花心江蓼养殖水体透明度在 1 m 以上,夏季晴天野外光强一般大于 $80\,000\text{ lx}$,水深约 0.5 m 处光强一般大于 $25\,000\text{ lx}$,高于菊花心江蓼的光饱和点和最大生长光强,但阴雨天气水下 0.5 m 处光强一般只有 $5\,000 \sim 10\,000\text{ lx}$,低于菊花心江蓼最适宜生长的光强.考虑到白天阳光光强的自然变化,上午和下午的光强比中午弱,因此,晴天江蓼的养殖水深一般控制约透明度的 $2/3$,即 $0.6 \sim 0.7\text{ m}$;阴到多云天气水深约为透明度的 $1/3$,即 $0.3 \sim 0.4\text{ m}$;较长时间的下雨天气,可以继续调低水深至 $0.2 \sim 0.3\text{ m}$.这样能保证江蓼生长水层的光强大部分时间处于最大生长率到光饱和点之间的光强,约为 $8\,000 \sim 20\,000\text{ lx}$ 之间,江蓼能够获取足够的光能进行光合作用,保持江蓼快速生长,又可避免光强太大造成光损伤.因此,日常养殖过程中应该根据水体的透明度和天气状况等及时调节适宜的养殖水深,使各种天气条件下的江蓼均能保持较大的生长率,提高江蓼的产量和经济效益.

2.8.2 江蓼光合特性在生态养殖中的应用 菊花心江蓼阳光下的产氧率一般大于 $2.0\text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$,光饱和产氧率约 $2.7\text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$,均高于细基江蓼繁枝变种和龙须菜的产氧率^[5-6].鱼类的耗氧率一般是 $0.1 \sim 0.5\text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ^[10-12],虾的耗氧率一般是 $0.23 \sim 0.45\text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ^[13-16],可见,江蓼的产氧率是鱼、虾耗氧率的几倍至十几倍.若菊花心江蓼产氧率以 $2.0\text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 计,养殖水深为 0.5 m ,养殖密

度为 $5\text{ t}/\text{hm}^2$,晴天江蓼产氧每小时可使水体 DO 浓度提高 $2.0\text{ mg}/\text{dm}^3$.因此,利用菊花心江蓼与鱼、虾等经济动物进行生态养殖,只需较少数量的江蓼便可保证养殖水体中氧的供需平衡,减少因缺氧导致动物死亡的可能性;江蓼还能有效地吸收氨等有害物质,防止水质恶化,减少发病率.

但是,由于江蓼本身的呼吸作用也需消耗一定的氧,如果密度太大,夜间对水中 DO 的消耗量比较大,也可能出现缺氧现象,严重时导致养殖动物死亡.由于对虾死亡后沉在水底直至腐烂,不易被察觉,许多养殖户到收获时发现对虾产量很低却不知什么原因;一些大量吊养大型海藻的比较封闭的海湾网箱养殖区,在较长时间阴雨天气出现养殖鱼类、鲍鱼大量死亡的现象可能也与海上养殖密度过大,出现夜间水体缺氧有关.

菊花心江蓼平均耗氧率为 $0.121\text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$,若养殖水深为 0.5 m ,养殖密度为 $15\text{ t}/\text{hm}^2$,由于菊花心江蓼的呼吸导致 12 h 水体 DO 浓度下降约 $4.35\text{ mg}/\text{dm}^3$,若在晴天,白天江蓼的光合作用使水体保持较高的 DO 浓度,夜间较不容易出现缺氧状态;若在雨天,夏天傍晚时养殖池水中的 DO 浓度一般为 $5 \sim 6\text{ mg}/\text{dm}^3$,菊花心江蓼耗氧可能导致夜间水中 DO 浓度低于 $1\text{ mg}/\text{dm}^3$,加之其它养殖动物、水柱和底泥等呼吸消耗 DO ,很可能在夜间特别是凌晨出现严重缺氧和养殖动物死亡.如对虾的窒息点一般在 $0.6 \sim 1.5\text{ mg}/\text{dm}^3$ ^[14, 16],鱼类的窒息点波动较大,一般在 $1\text{ mg}/\text{dm}^3$ 左右^[11-12],水中 DO 浓度低于鱼虾的窒息点时就会导致鱼虾死亡,即使不发生死亡,经常性的缺氧也会影响养殖动物的正常生长,导致发病率上升.因此,生态养殖中应根据养殖动物的耗氧率、养殖密度控制菊花心江蓼的密度,一般情况下菊花心江蓼的密度不宜超过 $10\text{ t}/\text{hm}^2$,养殖动物密度和耗氧率较大时,菊花心江蓼的密度最好低于 $7.5\text{ t}/\text{hm}^2$,较低的江蓼密度(如 $5\text{ t}/\text{hm}^2$)可以向水体提供足够的 DO ,并有利于防止出现夜间水体缺氧.总之,利用江蓼进行生态养殖,较少的江蓼数量就可以保持水中 DO 的供需平衡,要注意控制总体养殖密度,防止出现夜间缺氧.

2.8.3 江蓼光合特性在生态修复中的应用 对于过度养殖造成环境污染,养殖功能退化的区域,其特征通常是水中 DO 浓度低, DIN 、 DIP 浓度高.根据菊花心江蓼的光合特性,用于生态修复的江蓼水深应低于正常的养殖江蓼的水深,宜控制生态修复的江蓼深度约为水体透明度的 $1/4 \sim 1/3$,江蓼养殖水层的光强在 $20\,000 \sim 40\,000\text{ lx}$ 之间,大于正常的江蓼

养殖的适宜光强,保证正常情况下江蓠的光照强度处于饱和,但不出现光抑制的状态,江蓠能最大限度地向水体供氧,并保持较大的 DIN、DIP 的吸收速率,有利于缓解水体的缺氧状态和降低水体的富营养化程度.如福建省东山县的八尺门网箱养殖区水体交换能力差,经过 20 多年的养殖,淤积严重,水质恶化,经常发生大面积的死鱼事故,养殖功能严重退化,大部分网箱经常处于空置状态.现场实验结果表明,网箱养殖区的 DO 浓度最低,高密度的网箱养殖容易造成水体缺氧,江蓠修复区的 DO 浓度明显高于外围区域,江蓠产生的 DO 提高了周边水域的 DO 浓度^[1].大面积养殖江蓠可以有效提高水中的 DO 浓度,防止出现水体缺氧状态,江蓠对污染水体具有良好的修复效果^[2].在其它网箱养殖区、对虾、鲍养殖池排水海区的修复结果也证实了相同的结论^[2,17].因此,在功能退化的养殖区轮养或套养江蓠等大型海藻,可以逐渐改善水质,恢复养殖功能.

3 结论

(1)菊花心江蓠的光合速率随光强的变化而变化,光饱和点约 20 000 ~ 22 000 lx,光限制阶段,江蓠的产氧率随光强的增大而增大;光饱和阶段,产氧

率基本保持恒定;光强大于 45 000 lx 以后,表现出一定程度的光抑制现象.菊花心江蓠阳光下的产氧率一般大于 2.0 mg/(g·h),光饱和产氧率约 2.7 mg/(g·h).菊花心江蓠的最大生长速率的光强约 14 000 lx,生长率随光强增大呈先上升后下降的趋势.从光强较弱的 4 500 lx 至很大的 36 300 lx 的宽广范围内,菊花心江蓠均能保持约 5% ~ 7% 的较大生长率.

(2)实际生产中,应根据水体的透明度和天气状况等及时调节适宜的养殖水深,晴天江蓠的养殖水深一般控制约透明度的 2/3,即 0.6 ~ 0.7 m;阴到多云天气水深约为透明度的 1/3,即 0.3 ~ 0.4 m;较长时间的下雨天气,可继续调低水深至 0.2 ~ 0.3 m.生态养殖中,应根据养殖动物密度控制适宜的江蓠养殖密度,避免出现缺氧状态,一般情况下菊花心江蓠的密度不宜超过 10 t/hm²,养殖动物密度和耗氧率较大时,菊花心江蓠的密度最好低于 7.5 t/hm².用于生态修复时,保持养殖水层较大的光强有利于提高江蓠的产氧率,江蓠养殖水深约为水体透明度的 1/4 ~ 1/3,江蓠养殖水层的光强在 20 000 ~ 40 000 lx 之间.

参考文献:

- [1] 汤坤贤,焦念志,游秀萍,等.菊花心江蓠在网箱养殖区的生物修复作用[J].中国水产科学,2005,12(2):156-161.
- [2] 汤坤贤,游秀萍,林亚森,等.龙须菜对富营养化海水的生物修复[J].生态学报,2005,25(11):3 044-3 051.
- [3] 汤坤贤,袁东星,林泗彬,等.江蓠对赤潮消亡及主要水质指标的影响[J].海洋环境科学,2003,22(2):24-27.
- [4] 刘思俭,曾淑芳.江蓠在不同水层中的光合作用与生长[J].水产学报,1982,6(1):59-64.
- [5] 刘思俭,向曙光,林本松,等.江蓠的光合作用研究:不同光照强度对光合作用的影响[J].水产学报,1985,9(1):29-35.
- [6] 毛玉泽,杨红生,周毅,等.龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)的生长、光合作用及其对扇贝排泄氮磷的吸收[J].生态学报,2006,26(10):3 225-3 231.
- [7] 卢晓,李美真,王志刚,等.光照和温度对脆江蓠的生长和生化组成的影响[J].中国水产科学,2014,21(6):1 236-1 243.
- [8] 钟志海,黄中坚,陈伟洲.不同环境因子对异枝江蓠的生长及生化组分的影响[J].渔业科学进展,2014,35(3):98-104.
- [9] 汤坤贤.近海富营养化生物修复及其微生态效应[D].厦门:厦门大学,2009:84-85.
- [10] 孙忠,余方平,姚海富,等.网箱养殖大黄鱼和美国红鱼的耗氧率与氮排泄率[J].浙江海洋学院学报(自然科学版),2004,23(3):207-210.
- [11] 杜启艳,常重杰.四种鱼耗氧率和窒息点的研究[J].河南水产,2004(1):31-32.
- [12] 陈婉情,吴洪喜,吴亮.5种海水养殖鱼类幼鱼的耗氧率及窒息点[J].海洋学研究,2015,3(2):76-81.
- [13] JIANG J N. Study of oxygen consumption rate, CO₂ exhaust, respiratory quotient and tolerance to low dissolved oxygen in four shrimps species[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 1999, 19(1): 10-16.
- [14] 陈琴,陈晓汉.南美白对虾耗氧率和窒息点的初步测定[J].水利渔业,2001,21(2):14-15.
- [15] 李松青,林小涛,李卓佳,等.摄食对凡纳滨对虾耗氧率和氮、磷排泄率的影响[J].热带海洋学报,2006,25(2):44-48.
- [16] 王慧,来琦芳,房文红. K⁺ 对中国明对虾幼虾生存及耗氧率、窒息点的影响[J].中国水产科学,2007,14(3):493-

497.

[17] 汤坤贤. 龙须菜对网箱养殖区的生物修复研究[J]. 中国水产科学, 2007, 14(3): 488-492.

Photosynthesis characteristics of *Gracilaria lichevoides*
and application to culture and bioremediation

TANG Kun-xian¹, LIN Si-bin², TANG Pu-yi³, CHEN Yu-zhen¹, CHEN Min-er², LIN Ya-sen²,
SUN Yuan-min¹, CAI Lu-chun¹

(1. Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005, China; 2. Ecological Environmental Science Institute
of Dongshan, Dongshan 363400, China; 3. Shanghai Ocean University, Shanghai 200433, China)

Abstract:The effects of light intensity on oxygen production and consumption rates of *Gracilaria lichevoides* were studied by “light-dark bottle” oxygen method in indoor and outdoor experiments. The results indicate that under 20 000 lx the rate of oxygen production by *G. lichevoides* and the light intensity showed linear relationship by correlated equation of $y = 0.000\ 144\ 3x - 0.122\ 1$ ($R^2 = 0.993\ 8$). The oxygen consumption rate of *G. lichevoides* was $0.121 \pm 0.010\ \text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$, the light compensation point was 825 lx, the saturation point was between 20 000 and 22 000 lx and the oxygen production rate at light saturation point was $2.723 \pm 0.329\ \text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$. The oxygen production rate was basically unchanged when light intensity was above light saturation point, but it decreased slightly and showed a slight photo-inhibition above 45 000 lx. The light intensity, measured with the changes of water depth, showed that it was 14 000 – 15 000 lx when the water depth was less than the Secchi depth, and under this light intensity, the growth rate of *G. lichevoides* reached the highest. It was found that exorbitant breeding density could occur aquatic hypoxia early in the morning by measuring diurnal variation of dissolved oxygen concentration in different cultivation mode. According to the photosynthesis characteristics of *G. lichevoides*, methods by adjusting the depth of the water for *G. lichevoides* cultivation or bioremediation, and controlling breeding density for ecological aquaculture were proposed to maintain high economic and ecological benefits for the request of different conditions.

Key words:marine biology; *Gracilaria lichevoides*; photosynthesis characteristics; culture; bioremediation

DOI:10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2018. 04. 009

(责任编辑:杜俊民、肖 静)