

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.18373

汕头南澳龙须菜规模栽培对水质和浮游植物的影响

刘之威, 罗洪添, 武宇辉, 任辉, 杨宇峰

暨南大学生命科学技术学院, 广东 广州 510632

摘要: 为研究大型海藻龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)规模栽培对水质和浮游植物的影响, 于2016年3—6月在南澳深澳湾选择龙须菜栽培区(G)、鱼类养殖区(F)和对照区(C)3个采样区域, 每个采样区域3个采样点, 进行每月1次的采样调查。对海水温度(WT)、盐度(salinity)、pH、溶氧(DO)、总氮(TN)、总磷(TP)、无机氮(DIN)、无机磷(DIP)、叶绿素 a(Chl a)和浮游植物密度进行测试分析。结果表明: (1)在龙须菜栽培期和收获期(3—5月), 龙须菜栽培区的 pH 和 DO 均显著高于其余区域($P < 0.05$), 收获后各区域无显著性差异($P > 0.05$); (2)在龙须菜栽培期(3—4月), 栽培区的 TN、TP、DIN 和 DIP 含量均显著低于对照区和鱼类养殖区($P < 0.05$); (3)龙须菜栽培期间和收获期(3—5月)栽培区浮游植物密度显著低于其他区域($P < 0.05$), 龙须菜收获后(6月), 3个采样区域浮游植物的密度大幅上升; (4)2016年南澳海域共收获龙须菜 49729 t, 据估算, 龙须菜规模栽培从海水中移除了 2212 t N、174 t P 和 13300 t C, 至少释放了 34700 t O_2 。研究表明, 龙须菜规模栽培能有效去除 N、P 营养盐, 防治海洋富营养化; 提高栽培区域的 pH 和 DO, 有利于防治海洋酸化和低氧问题; 降低浮游植物密度, 抑制有害藻华的发生。

关键词: 龙须菜; 富营养化; 海洋酸化; 低氧

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)01-0099-09

龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)隶属于红藻门(Rhodophyta), 杉藻目(Gigartinales), 江蓠属, 具有生长快、富含琼胶、营养价值高的特点^[1-2]。2000年以来, 中国沿海推广龙须菜栽培, 产业发展迅猛, 江蓠属产量由2003年的 5.05×10^4 t 发展到2016年的 29.32×10^4 t, 仅次于海带^[3]。南澳岛位于广东省汕头市, 自2000年开始引进龙须菜, 栽培面积由2000年的 0.13 hm^2 增加到2011年的 1500 hm^2 , 成为中国重要的龙须菜栽培基地^[4-5]。

龙须菜规模栽培能为附生生物、鱼类和无脊椎动物等提供多样化的栖息环境, 增加生态系统的多样性。研究表明龙须菜在生长过程中能大量吸收无机氮磷, 降低水体中的营养盐含量, 能防治水体富营养化^[1]; 还能通过光合作用释放氧气, 提高水体溶解氧, 改善海水养殖环境, 是良好的生物修复材料^[6], 并具有很好的固碳潜力^[7]。此外

龙须菜等大型海藻还能通过营养竞争和化感作用, 抑制浮游植物的生长, 防治有害藻华暴发^[5, 8-10]。

本研究通过分析2016年3—6月南澳岛深澳湾龙须菜栽培区及其邻近水域的 pH、溶氧(DO)、无机氮(DIN)、无机磷(DIP)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl a)和浮游植物结构的变化, 并结合统计资料估算龙须菜栽培从海域中移除的 C、N、P 及其向海水中释放的 O_2 , 以研究龙须菜规模栽培对栽培区水环境的影响, 以期探讨海区现场大型海藻栽培对近海生态系统的影响, 为海洋环境保护提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 采样位置及时间

深澳湾位于南澳岛北部, 水域面积 13.3 km^2 , 水深 1.1~6.3 m, 平均水深 1.9 m, 是南澳重要的

收稿日期: 2018-11-09; 修订日期: 2018-11-27.

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201403008); 国家自然科学基金项目(41503072).

作者简介: 刘之威(1988-), 博士研究生, 从事大型海藻与浮游植物研究. E-mail: zwliumost@126.com

通信作者: 杨宇峰(1963-), 研究员, 研究方向为海洋环境和水生生物学. E-mail: tyf@jnu.edu.cn

经济动物养殖区和大型海藻栽培区。本研究选择深澳湾内的鱼类养殖区(fish culture area, F)、龙须菜栽培区(*Gracilaria* culture area, G)及两者之间无养殖和栽培活动的自然海域(control area, C)作为调查区域,每个区域选择 3 个采样点,分别记为 F₁、F₂、F₃, G₁、G₂、G₃, C₁、C₂、C₃(图 1)。于 2016 年 3 月 25 日、4 月 24 日、5 月 23 日、6 月 22 日进行 4 个航次的调查采样。3 月和 4 月(生物量最大)为龙须菜的栽培期,5 月为龙须菜的收获期(生物量减少),6 月龙须菜已经收获完毕。

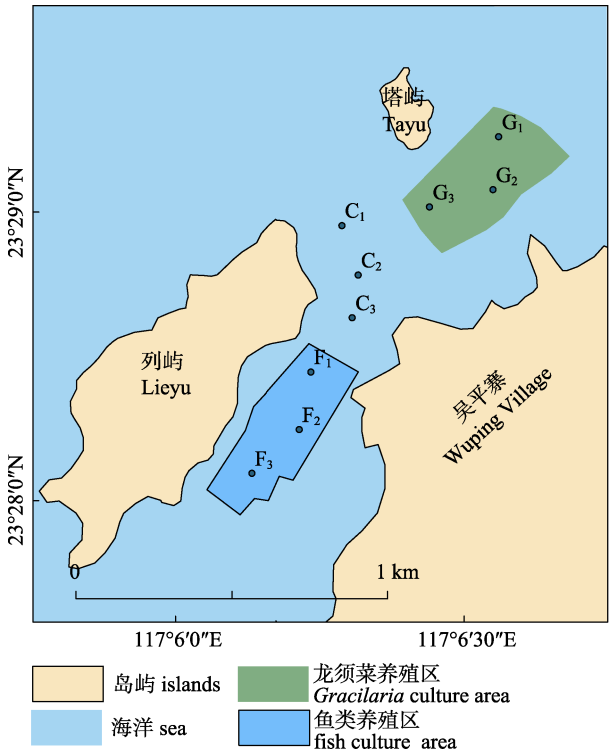


图 1 南澳深澳湾采样点分布图
Fig. 1 Sampling sites distribution in Shen'ao Bay of Nan'ao Island

1.2 水样的采集和水质测定

调查海域的水温、盐度、溶氧(DO)、pH 在采样现场用 YSI 仪器测量并记录。总氮(TN)、总磷(TP)、无机氮(DIN)、无机磷(DIP)则依据《海洋调查规范》^[11]和《海洋监测规范》^[12]规定的方法进行采样和测定。叶绿素 a(Chl a)的测定采用丙酮萃取法^[13]。

1.3 浮游植物样品采集与分析

浮游植物定性样品使用 40 μm 浮游生物网采集,用于种类鉴定。定量样品使用有机玻璃采水

器,采集 1 L 水样后装于高密度聚乙烯瓶,加入鲁哥试剂,混匀,旋紧瓶盖贮存。回到实验室后,将样品分次逐渐浓缩至 30 mL,在显微镜下通过传统形态学进行分类鉴定。

1.4 龙须菜生物量测量

在龙须菜采样点随机选取 3 条 1 m 长的苗绳,测量苗绳上龙须菜的簇长,称重并记录。

1.5 计算从海水中移除的 C、N、P

查阅国内外文献中龙须菜组织的 C、N、P 含量,计算 C、N、P 平均值(表 1)。查阅《汕头统计年鉴》^[14],得到南澳 2016 年龙须菜的产量 49729 t(干重)。则海水中移除营养盐或碳的量=龙须菜组织内营养盐或碳的平均含量×产量。

表 1 中国龙须菜组织内 C、N、P 的平均含量
Tab. 1 Average values (%DW) of tissue C, N and P content for *Gracilaria lemaneiformis* cultured in China
%干重 % dry weight

元素含量 element content	平均值 mean	标准差 SD	样本量 n	文献 reference
C	30.5	1.22	5	[15-16]
N	4.45	1.50	14	[15-18]
P	0.35	0.12	6	[16-17]

1.6 数据处理与分析

数据以平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)表示,利用 R 语言进行数据统计和方差分析, $P < 0.05$ 为差异性显著。空间插值应用 ArcGIS 地理统计分析 Geostatistical Analyst 模块完成。

2 结果与分析

2.1 水温和盐度

调查期内,相同航次各采样点水温和盐度空间变化不大,但不同季节变化较大(表 2)。水温由 3 月份的(14.30±0.20)℃逐步上升到 6 月份的(28.67±0.47)℃。盐度的变化较大,4 月和 6 月的盐度显著低于 3 月和 5 月($P < 0.05$),这主要是因为这两个时期降雨量较大,大量淡水进入近海采样区域降低了海水的盐度。

2.2 龙须菜生物量的变化

由表 3 可知,单位苗绳上龙须菜的生物量和簇长均在 3 月最低($P < 0.05$),随着龙须菜的生长,

表 2 2016 年 3—6 月南澳深澳湾水温和盐度的时空变化
Tab. 2 Spatial-temporal variation of water temperature (WT) and salinity in Shen'ao Bay of Nan'ao Island from March to June, 2016

n=9; $\bar{x} \pm SD$			
时间 time	水温/℃ WT	盐度 salinity	
3 月 March	14.30±0.21 ^a	31.16±0.07 ^a	
4 月 April	23.47±0.27 ^b	26.66±0.50 ^b	
5 月 May	25.43±0.29 ^c	30.74±0.83 ^a	
6 月 June	28.67±0.47 ^d	26.39±0.57 ^b	

注: 同列上标字母不同者表示显著差异($P<0.05$).
Note: Different superscripts in the same column denote significant differences ($P<0.05$).

表 3 2016 年 3—5 月 1 m 苗绳上龙须菜生物量和簇长的变化
Tab. 3 Biomass and cluster length variation of *Gracilaria lemaneiformis* in 1 m seeding rope from March to June, 2016

$\bar{x} \pm SD$		
时间 time	生物量/kg biomass	簇长/cm cluster length
3 月 March	0.55±0.12 ^a (3)	29.13±8.70 ^a (15)
4 月 April	2.47±0.23 ^b (3)	42.00±6.65 ^b (15)
5 月 May	2.00±0.15 ^c (3)	43.57±9.01 ^b (15)

注: 同列上标字母不同者表示显著差异($P<0.05$). 括号内数字表示样本量.
Note: Different superscripts in the same column denote significant differences ($P<0.05$). Figures in the bracket represent sample size.

生物量和簇长增加。虽然龙须菜的簇长在 4 月份和 5 月份无显著性差异($P>0.05$), 但 4 月份生物量最高($P<0.05$), 大于 5 月份, 这主要是因为 5 月水温较高, 大量篮子鱼从外海游到南澳近海啃食龙须菜及自然脱落等因素造成的苗绳上龙须菜生物量损失。从整体上看, 4 月份龙须菜的生物量最大, 且龙须菜栽培面积较大, 栽培区域龙须菜现存量最大。5 月中下旬, 龙须菜大量收获, 栽培面积减少, 龙须菜的现存量降低。

2.3 pH 和 DO 的时空变化

3 月至 6 月, pH 的变化范围为 7.98~8.48, DO 的变化范围为 6.44~15.8 mg/L(图 2)。从整体上看, 4 月的 pH 和 DO 最高, 3 月次之。在龙须菜的栽培期和收获期(3—5 月), 龙须菜栽培区的 pH 和 DO 均显著高于鱼类养殖区和对照区($P<0.05$)。而在龙须菜收获完后的 6 月, 3 个区域的 pH 和 DO 均无显著性差异($P>0.05$)。在龙须菜现存量最大的 4 月, 龙须菜栽培区的 pH 和 DO 相对其余两个区域的增加幅度远大于 3 月和 5 月。

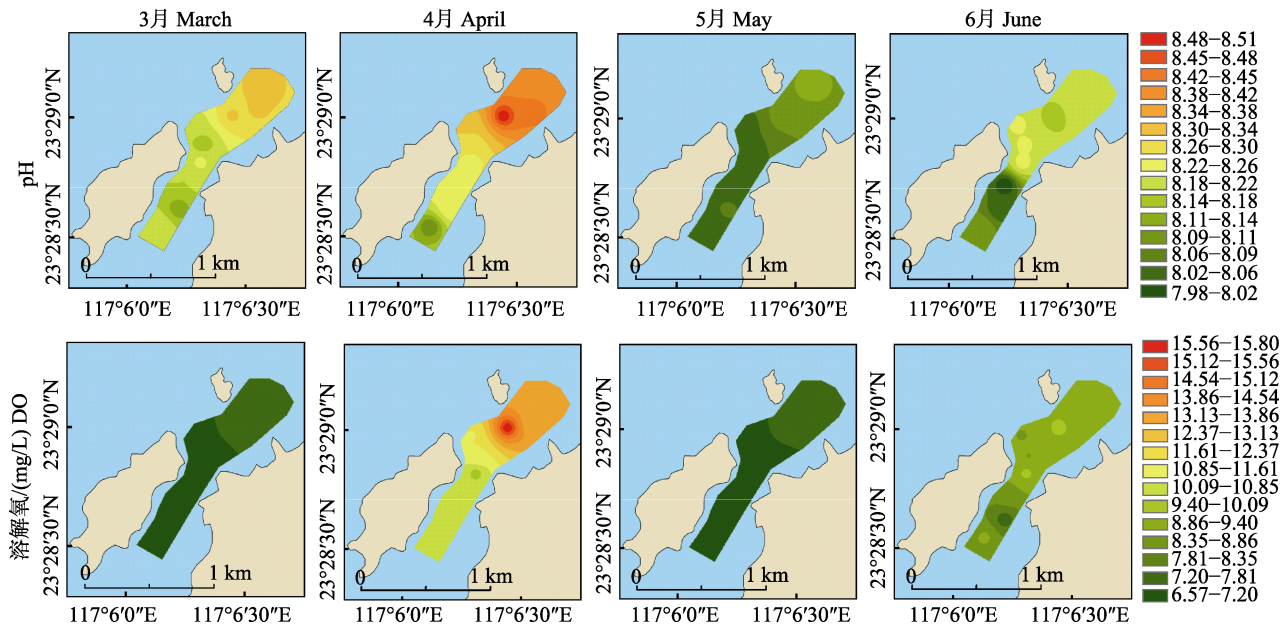


图 2 2016 年 3—6 月南澳深澳湾 pH 和溶解氧的时空变化
Fig. 2 Spatio-temporal variation of pH and dissolved oxygen (DO) in Shen'ao Bay of Nan'ao Island from March to June, 2016

2.4 营养盐的时空变化

3—6 月间, DIN 的变化范围为 11.66~25.65 $\mu\text{mol/L}$, DIP 的变化范围为 0.52~1.62 $\mu\text{mol/L}$, TN 的变化范

围为 28.94~91.98 $\mu\text{mol/L}$, TP 的变化范围为 0.98~9.78 $\mu\text{mol/L}$ (图 3)。在龙须菜的栽培期(3 月, 4 月), 栽培区的 DIN、DIP、TP 均显著低于其余两个区

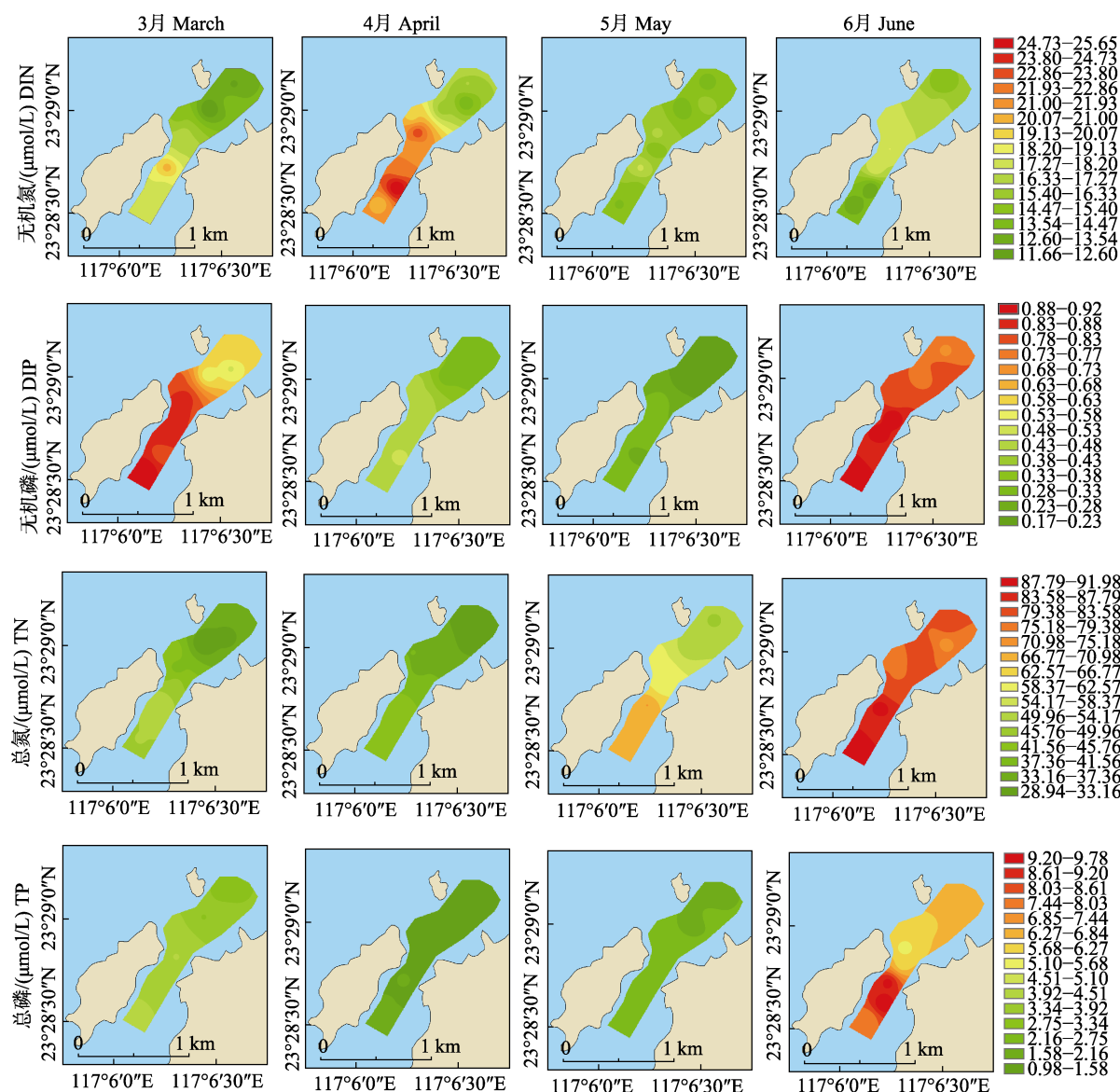


图 3 2016 年 3—6 月南澳深澳湾营养盐的时空变化

Fig. 3 Spatio-temporal variation of nutrients in Shen'ao Bay of Nan'ao Island from March to June, 2016

域($P < 0.05$)。在龙须菜收获期间(5 月),栽培区与其他区域的营养盐含量无显著性差异($P > 0.05$)。而在 6 月份,栽培区的 DIP 和 TP 显著低于鱼类养殖区($P < 0.05$),与对照区无显著性差异($P > 0.05$); DIN 则与其余区域无显著性差异($P > 0.05$)。栽培区中的 TN 在 3 月、4 月、5 月均显著低于其余区域,而在 6 月与对照区无显著性差异($P > 0.05$),显著低于鱼类养殖区($P < 0.05$)。很显然,龙须菜现存量较大时,对 N、P 营养盐的吸收能力较强,栽培区的营养盐浓度明显低于其余区域。但当龙须菜的现存量减少时,其营养盐吸收作用减弱,加上海水流动等因素,龙须菜降低营养盐效果不明显。

2.5 2016 年龙须菜收获从栽培海域移除的 N、P、C

根据产量数据^[14]和 1.5 的估算公式,2016 年南澳收获的龙须菜可从海水中移除 2212 t N、174 t P 和 13300 t C。按照光合作用的原理推算,龙须菜栽培至少向栽培海域释放了 34700 t O_2 。

2.6 浮游植物的时空变化

2016 年 3—6 月,深澳海域共鉴定浮游植物 103 种,其中硅藻 87 种,甲藻 11 种,绿藻 3 种,蓝藻 2 种。主要优势种为具槽帕拉藻(*Paraliasulcata*) (3 月)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*) (4 月)、角毛藻(*Chaetoceros* sp.) (5 月)和海链藻(*Thalassiosira* sp.) (6 月)。

采样期间, Chl a 的变化范围为 1.47~37.02 $\mu\text{g/L}$, 浮游植物细胞密度的变化范围为 $0.80 \times 10^4 \sim 42.10 \times 10^4 \text{ cells/L}$ (图 4)。栽培期间(3—4 月)栽培区 Chl a 含量和浮游植物细胞密度要显著低于其余区域 ($P < 0.05$), 龙须菜收获期间和收获后, Chl a 含量和细胞密度与其余区域无显著性差异 ($P > 0.05$)。说明龙须菜对浮游植物的生长具有一定的抑制作用。

3 讨论

3.1 龙须菜规模栽培对营养盐的去除作用

N、P 是海洋生态系统的限制性营养物质^[19],

由于人类活动影响加剧, 大量的 N、P 被输入到海洋中, 造成了海水富营养化, 对全球生物多样性和生态系统产生了重大影响^[19-22]。龙须菜等大型海藻具有良好的营养盐移除能力, 其大规模栽培能缓解沿海的富营养化^[10]。根据海藻产量、营养组成和中国沿海水域的 N、P 含量, Xiao 等^[23]指出中国的海藻栽培每年可消除大约 75000 t N 和 9500 t P, 栽培 1 hm^2 海藻可去除 17.8 hm^2 的氮和 126.7 hm^2 的磷, 并推断, 增加 17 倍的海藻栽培面积可 100% 去除掉中国沿海输入的 N, 而输入的 P 只需增加 1.5 倍的栽培面积即可完全去除。

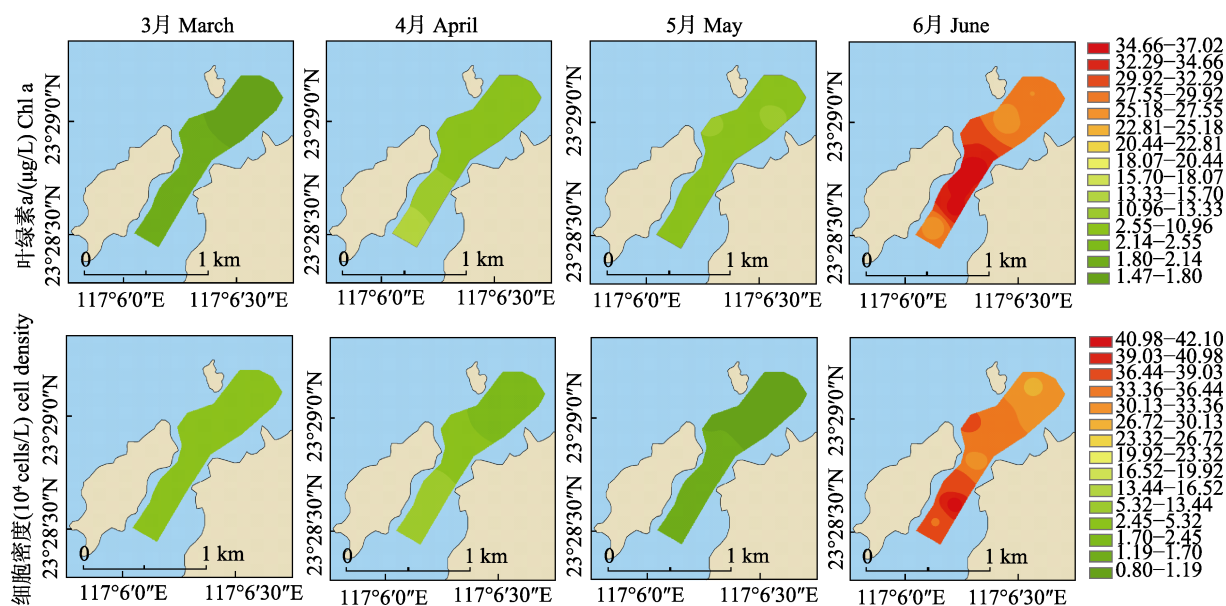


图 4 2016 年 3—6 月南澳深澳湾浮游植物叶绿素 a 含量和细胞密度的时空变化

Fig. 4 Spatio-temporal variation of Chl a content and cell density of phytoplankton in Shen'ao Bay of Nan'ao Island from March to June, 2016

本研究中, 龙须菜栽培时特别是生物量较大的 4 月, 栽培区营养盐浓度显著低于对照区, 表明大型海藻龙须菜栽培有效地从海水中移除了 N、P 营养盐。相似的结果也出现在其他的报道中。Mao 等^[15]发现龙须菜能有效吸收扇贝养殖水体中的 N、P。He 等^[24]指出栽培紫菜后, 栽培区 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的含量相对对照区分别降低了 50%~94%、42%~91%、21%~38%和 42%~67%。另外 Wu 等^[25]和 He 等^[24]认为大型海藻的规模栽培能有效地将 N、P 从海水中移除, 具有良好的生物修复能力。也有研究者认为虽然大型海藻的生物修复能力很强, 但如果栽培海域的富营养程度过高, 其生理状态和生命活动会受到影响,

无法达到生物修复的目的^[17, 25]。

3.2 有效防治海洋酸化和近海低氧

海洋酸化和低氧是有待解决的海洋环境问题。海洋酸化主要是因为人类过度的生产活动提高了海水中 CO_2 浓度, 导致碳酸盐平衡体系偏移, pH 降低, 从而改变海洋生态系统结构^[26-27]。与外海相比, 近海因易受陆地输入 CO_2 和酸性物质的影响, 表现出更强的酸性和高度可变性。低氧一方面指的是低氧区(hypoxic zone), 即在海水中富营养化和上升流的影响下, 下层水体中 O_2 消耗后无法通过快速补充而形成的低氧区域^[28]。至 2008 年, 全球低氧区的面积已经超过了 245000 km^2 , 并呈继续扩大的趋势^[22, 29]。另一方面是海水中 DO

总量也在不但减少,根据模型预测,海洋中 DO 的含量将在 100 年内下降 1%~7%,并将在 1000 年甚至更长的时间内进一步下降^[30]。同时,在低氧区 CO₂ 能更容易被海水吸收,这将加剧海洋酸化^[26]。

龙须菜等大型海藻规模栽培能有效地降低海洋酸化,遏制近海低氧。本研究中,在龙须菜生物量最大的 4 月,pH 和 DO 最高,且栽培区的 pH 和 DO 在栽培期和收获期均显著高于其他区域,是因为大型海藻光合作用能固定二氧化碳,降低海水中的 CO₂ 和 H⁺ 浓度,释放 O₂,提高 pH 和 DO^[31-33]。虽然浮游植物也具有提高海水 pH 和 DO 的作用,但 3—5 月浮游植物生长受到龙须菜的抑制,密度相对较小,影响较小,龙须菜是影响研究区域海水 pH 和 DO 的主要因素。大型海藻规模栽培能有效提高栽培海域的 pH 的 DO,这一结论也被其他研究者所证实^[34-35]。有研究者认为增加大型海藻的面积和产量将进一步提高栽培海域的 pH 和 DO,有效防止海洋酸化和低氧。根据大型海藻的碳含量、产量^[36]推算,2015 年全球大型海藻栽培至少向海水中净释放了 2.42×10^6 t O₂,而在 2016 年南澳大型海藻的栽培至少向海水中净释放 3.47×10^4 t O₂,有利于提高栽培海域及其邻近区域的 DO;同时大型海藻的规模栽培能减轻海水富营养化程度,减轻低氧区的不利影响,并在相当程度上遏制低氧区的扩大。本研究结果为规模栽培大型海藻解决海洋酸化和低氧问题提供了新的思路解决方案。

3.3 龙须菜规模栽培的固碳潜力

全球范围内,碳排放量以前所未有的速度增加,对物种、自然生态系统和人类健康、基础设施及经济等造成许多负面影响。维持和提高沿海生态系统吸收和储存碳的能力是减缓气候变化的关键因素。全球近岸区域从大气中吸收的 CO₂ 总量达到 0.33~0.36 Pg(C)/年,占开放海域每年吸收 CO₂ 的 27%~30%^[37]。大型海藻与近海碳循环密切相关^[2]。C 是大型海藻的主要组成成分,通过光合作用固定在大型海藻中。而与被子植物等类型的栖息地相比,虽然在全球尺度上大型海藻具有最主要的沿海初级生产力,但因其栖息地不能集聚大

量有机碳,其在海洋碳汇中的作用经常被忽视^[38-39]。

人工栽培大型海藻能增加海洋碳汇。根据海藻产量^[36]、营养组成估算,全球仅 2015 年就通过收获大型海藻从海洋转移了 1.30×10^6 t C。本研究表明,仅 2016 年南澳通过收获龙须菜的方式就从海水中共移除 13300 t C。而且根据近年来的研究,深海和沉积物中存在大量的海藻碳。在与空气隔绝的深海和沉积物中,大型海藻是封存的碳的主要来源。研究显示,通过运输至深海和沉降的方式,大型海藻在全球范围内能固碳 173 Tg/a(范围为 61~268 Tg/a),超过了以被子植物为主的沿海栖息地的碳封存量^[40]。

3.4 龙须菜规模栽培对有害藻华的防治

有害藻华(HABs)主要是由沿海富营养化导致藻类大量繁殖引起的。近几十年来对海洋环境、公共健康和经济发展造成了巨大威胁^[41]。自 20 世纪 60 年代开始,人们使用物理、化学、生物等方法对藻华进行防治、控制和缓解^[42],其中部分方法能取得明显的短期效果,但最终可能给环境带来长期的负面影响。近来的研究表明,一些大型海藻对浮游植物特别是部分有害藻华种类,具有较强的生长抑制作用。大型海藻的规模栽培被认为是一种生态、环保、经济的方式来防治有害藻华^[3]。

本研究中,栽培区的浮游植物细胞密度和叶绿素含量在栽培期显低于其余区域($P < 0.05$),表明龙须菜栽培能抑制浮游植物的生长,与已有的研究结果一致^[10, 24, 35, 43]。这不仅是因为龙须菜等大型海藻在与浮游植物营养竞争中的优势^[44],还因为其对浮游植物特别是部分有害藻华种类,具有较强的化感作用^[10]。研究证明龙须菜对锥状斯氏藻(*Scrippsiella trochoidea*),海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*),杜氏盐藻(*Dunaliella salina*)具有很强的抑制作用^[10, 45]。Ye 等^[46]指出龙须菜干粉能抑制锥状斯氏藻光合作用。卢慧明等^[47]从龙须菜分离了 12 种化合物中,证实了亚油酸的化感抑制作用最强,能对藻的细胞膜、叶绿体、线粒体、细胞核等亚显微结构造成不同程度的破坏。因此,大规模栽培龙须菜是一种防治有害藻华的经济、环保方式。

参考文献:

- [1] Yang Y, Chai Z, Wang Q, et al. Cultivation of seaweed *Gracilaria* in Chinese coastal waters and its contribution to environmental improvements[J]. *Algal Research*, 2015, 9: 236-244.
- [2] Kang Y N, Sun X, Xu N J, et al. Medicinal application and antitumor activity of *Gracilariopsis lemaneiformis*[J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2016, 16(11): 2175-2177. [康亚妮, 孙雪, 徐年军, 等. 龙须菜的药用价值及其抗肿瘤活性[J]. *现代生物医学进展*, 2016, 16(11): 2175-2177.]
- [3] National Bureau of Statistics. China Fishery Statistics Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016. [国家统计局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.]
- [4] Yang Y F, Liu Q, Chai Z Y, et al. Inhibition of marine coastal bloom-forming phytoplankton by commercially cultivated *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta)[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2015, 27(6): 2341-2352.
- [5] Yang Y, Liu Q, Chai Z, et al. Inhibition of marine coastal bloom-forming phytoplankton by commercially cultivated *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta)[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2015, 27(6): 2341-2352.
- [6] Yang Y F, Song J M, Lin X T, et al. Seaweed cultivation and its ecological roles in coastal waters[J]. *Marine and Environmental Sciences*, 2005, 24(3): 77-80. [杨宇峰, 宋金明, 林小涛, 等. 大型海藻栽培及其在近海环境的生态作用[J]. *海洋环境科学*, 2005, 24(3): 77-80.]
- [7] Sondak C F A, Ang P O, Beardall J, et al. Carbon dioxide mitigation potential of seaweed aquaculture beds (SABs)[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2017, 29(5): 2363-2373.
- [8] Wang R, Feng L, Tang X, et al. Allelopathic growth inhibition of *Heterosigma akashiwo* by the three *Ulva* species (*Ulva Pertusa*, *Ulva Linza*, *Enteromorpha intestinalis*) under laboratory conditions[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 31(3): 138-144.
- [9] Jin Q, Dong S L, Wang C Y. Allelopathic growth inhibition of *Prorocentrum micans* (Dinophyta) by *Ulva pertusa* and *Ulva linza* (Chlorophyta) in laboratory cultures[J]. *European Journal of Phycology*, 2005, 40(1): 31-37.
- [10] Lu H M, Xie H H, Gong Y X, et al. Secondary metabolites from the seaweed *Gracilaria lemaneiformis* and their allelopathic effects on *Skeletonema costatum*[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2011, 39(4-6): 397-400.
- [11] State Oceanic Administration. GB/T 12763.4-2007 Specifications for oceanographic survey. Part 4: Survey of chemical parameters in sea water[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [国家海洋局. GB/T 12763.4-2007 海洋调查规范. 第 4 部分: 海水化学要素调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [12] State Oceanic Administration. GB/T 17378.4-2007 The specification for marine monitoring Part 4: Seawater analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [国家海洋局. GB/T 17378.4-2007 海洋监测规范. 第 4 部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [13] Cheng C M, Huang W D, Zhang W. Comparison of different measurements on chlorophyll a concentration of phytoplankton in water[J]. *Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power*, 2016, 28(6): 59-63. [程春梅, 黄伟朵, 张伟. 水体浮游植物叶绿素 a 浓度测定方法比较[J]. *浙江水利水电学院学报*, 2016, 28(6): 59-63.]
- [14] Shantou Bureau of Statistics. Shantou statistical yearbook [CP/OL]. <http://www.shantou.gov.cn/tjj/2015tjnj/list.shtml>. [汕头市统计局. 汕头市统计年鉴[CP/OL]. <http://www.shantou.gov.cn/tjj/2015tjnj/list.shtml>.]
- [15] Mao Y Z, Yang H S, Zhou Y, et al. Potential of the seaweed *Gracilaria lemaneiformis* for integrated multi-trophic aquaculture with scallop *Chlamys farreri* in North China[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2009, 21: 649-656.
- [16] Zhou Y, Yang H S, Hu H Y, et al. Bioremediation potential of the macroalga *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) integrated into fed fish culture in coastal waters of north China[J]. *Aquaculture*, 2006, 252(2-4): 264-276.
- [17] Peng C L, Wen X, Lin Z F, et al. Response of *Gracilaria lemaneiformis* to nitrogen and phosphorus eutrophic seawater[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 505-512. [彭长连, 温学, 林植芳, 等. 龙须菜对海水氮磷富营养化的响应[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 505-512.]
- [18] Wu H L, Huo Y Z, Hu M, et al. Eutrophication assessment and bioremediation strategy using seaweeds co-cultured with aquatic animals in an enclosed bay in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 95(1): 342-349.
- [19] Cosme N, Jones M C, Cheung W W L, et al. Spatial differentiation of marine eutrophication damage indicators based on species density[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 676-685.
- [20] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [21] Gray J S, Wu R, Or Y Y. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 238: 249-279.
- [22] Diaz R J, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems[J]. *Science*, 2008, 321(5891): 926-929.

- [23] Xiao X, Agusti S, Lin F, et al. Nutrient removal from Chinese coastal waters by large-scale seaweed aquaculture[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 46613.
- [24] He P M, Xu S N, Zhang H Y, et al. Bioremediation efficiency in the removal of dissolved inorganic nutrients by the red seaweed, *Porphyra yezoensis*, cultivated in the open sea[J]. Water Research, 2008, 42(4-5): 1281-1289.
- [25] Wu H L, Huo Y Z, Zhang J H, et al. Bioremediation efficiency of the largest scale artificial *Porphyra yezoensis* cultivation in the open sea in China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 95(1): 289-296.
- [26] Melzner F, Thomsen J, Koeve W, et al. Future ocean acidification will be amplified by hypoxia in coastal habitats[J]. Marine Biology, 2013, 160(8): 1875-1888.
- [27] Clements J C, Chopin T. Ocean acidification and marine aquaculture in North America: potential impacts and mitigation strategies[J]. Reviews in Aquaculture, 2017, 9(4): 326-341.
- [28] Rabalais N N, Cai W, Carstensen J, et al. Eutrophication-driven deoxygenation in the coastal ocean[J]. Oceanography, 2014, 27(1): 172-183.
- [29] Vaquer-Sunyer R, Duarte C M. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(40): 15452-15457.
- [30] Keeling R F, Körtzinger A, Gruber N. Ocean deoxygenation in a warming world[J]. Annual Review of Marine Science, 2010, 2: 199-229.
- [31] Wang S J, Du H, Mei Z P, et al. Carbon fixation of *Gracilaria lemaneiformis* and its environmental regulation in Shen'ao bay in spring[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(3): 343-348. [王首吉, 杜虹, 梅志平, 等. 春季深澳湾龙须菜固碳量及其影响因素[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(3): 343-348.]
- [32] Wei Z L, Han H B, Hu M, et al. Seasonal variation of sea-air CO₂ flux in mariculture area in Yantian Harbor, Sansha Bay[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(1): 106-115. [韦章良, 韩红宾, 胡明, 等. 三沙湾盐田港海水养殖海域海-气界面 CO₂ 交换通量的时空变化[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(1): 106-115.]
- [33] Xu Y J, Fang J G, Tang Q S, et al. Improvement of Water Quality by the Macroalga, *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta), near aquaculture effluent outlets[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2008, 39(4): 549-555.
- [34] Zhou Y Y, Li C H, Chen P M, et al. Structure of *Gracilaria lemaneiformis* bed and its effect on the factors of water environment[J]. Ecological Science, 2011, 30(6): 590-595. [周岩岩, 李纯厚, 陈丕茂, 等. 龙须菜海藻场构建及其对水环境因子的影响[J]. 生态科学, 2011, 30(6): 590-595.]
- [35] Liu Y Y, Zhang J W, Han J J, et al. Large-scale cultivation of *Sargassum vachellianum* in the coast of Gouqi Island and its effects on water environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(11): 3214-3220. [刘媛媛, 张建伟, 韩军军, 等. 枸杞岛瓦氏马尾藻养殖及其对水环境因子的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3214-3220.]
- [36] FAO. Global aquaculture production 1950-2015[CP/OL]. <http://www.fao.org/fishery/statistics/global-aquaculture-production/en>.
- [37] Chen C T A, Borges A V. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO₂[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2009, 56(8-10): 578-590.
- [38] Duarte C M, Losada I J, Hendriks I E, et al. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(11): 961-968.
- [39] Hill R, Bellgrove A, Macreadie P I, et al. Can macroalgae contribute to blue carbon? An Australian perspective[J]. Limnology and Oceanography, 2015, 60(5): 1689-1706.
- [40] Krause-Jensen D, Duarte C M. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(10): 737-742.
- [41] Anderson D M, Cembella A D, Hallegraeff G M. Progress in understanding harmful algal blooms: Paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management[J]. Annual Review of Marine Science, 2012, 4: 143-176.
- [42] Tilney C L, Pokrzywinski K L, Coyne K J, et al. Growth, death, and photobiology of dinoflagellates (Dinophyceae) under bacterial-algicide control[J]. Journal of Applied Phycology, 2014, 26(5): 2117-2127.
- [43] Huo Y Z, Wu H L, Chai Z Y, et al. Bioremediation efficiency of *Gracilaria verrucosa* for an integrated multi-trophic aquaculture system with *Pseudosciaena crocea* in Xiangshan harbor, China[J]. Aquaculture, 2012, 326-329: 99-105.
- [44] Huang Y S, Ou L J, Yang Y F. Nutrient competition between macroalgae *Gracilaria lemaneiformis* and phytoplankton in coastal waters of Nan'ao island, Guangdong[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(4): 806-813. [黄银爽, 欧林坚, 杨宇峰. 广东南澳岛大型海藻龙须菜与浮游植物对营养盐的竞争利用[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(4): 806-813.]
- [45] Lu H M, Liao X J, Yang Y F, et al. Effects of extracts from *Gracilaria lemaneiformis* on microalgae[J]. Ecological Science, 2008, 27(5): 424-426.
- [46] 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.

[47] Lu H M. Chemical constituents of the seaweed *Gracilaria*

Lemaneiformis and their allelopathic effects on *Skeletonema Costatum*[D]. Guangzhou: Jinan University, 2011. [卢慧明. 大型海藻龙须菜化学成分及其对中肋骨条藻化感作用研究[D]. 广州: 暨南大学, 2011.]

Large-scale cultivation of *Gracilaria lemaneiformis* in Nan'ao Island of Shantou and its effects on the aquatic environment and phytoplankton

LIU Zhiwei, LUO Hongtian, WU Yuhui, REN Hui, YANG Yufeng

College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract: Seaweeds are the major primary producers, and play a vital role in coastal ecosystems. Since 2000, large-scale cultivation of *Gracilaria lemaneiformis* has rapidly developed along the Chinese coast. Nan'ao island is an important base for *G. lemaneiformis* cultivation in Guangdong. In order to study the effects of large-scale seaweed cultivation on the aquatic environment and phytoplankton, monthly surveys were carried out in the cultivation area of Shen'ao Bay in Nan'ao island from March to June 2016. In this study, fish culture area (F), *Gracilaria* culture area (G), and control area (C) without *Gracilaria* cultivation activities were selected for sampling. There were three sampling points per area, marked as F₁, F₂, F₃, G₁, G₂, G₃, C₁, C₂, and C₃, respectively. Four surveys were undertaken on March 25, April 24, May 23, and June 22, 2016. March and April were the cultivation periods, while May was the harvest period, and in June, no *Gracilaria* was cultured. Dissolved oxygen (DO), pH, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), inorganic nitrogen (DIN), inorganic phosphorus (DIP), phytoplankton density, and chlorophyll a (Chl a) contents were measured. Moreover, the amount of N, P, and C removed from seawater and the amount of O₂ released to seawater by *G. lemaneiformis* were estimated based on the statistical data from Nan'ao in 2016. The results showed that pH and DO in the *Gracilaria* culture area were significantly higher than those in other regions ($P < 0.05$) from March to May, with no significant difference ($P > 0.05$) between the sampling areas after seaweed harvest (June). The contents of TN, TP, DIN, and DIP in the *Gracilaria* culture area were lower than those in other areas ($P < 0.05$) from March to April. Similarly, phytoplankton densities and Chl a contents were significantly lower in the *Gracilaria* culture area than those in other areas ($P < 0.05$). The total produce of *G. lemaneiformis* in Nan'ao island for 2016 was 49729 t, removing 2212 t of N, 174 t of P, and 13000 t of C from seawater while releasing 34700 t of O₂ to seawater. Our results show that large-scale cultivation of *G. lemaneiformis* could effectively remove N and P, improve pH and DO, and inhibit phytoplankton growth. This has the potential to control seawater eutrophication, mitigate the impacts of ocean acidification and hypoxia, and prevent harmful algal blooms.

Key words: *Gracilaria lemaneiformis*; eutrophication; ocean acidification; hypoxia

Corresponding author: YANG Yufeng. E-mail: tyf@jnu.edu.cn