

文章编号: 1674-5566(2018)02-0221-09

DOI:10.12024/jsou.20170301983

环境因子对瓦氏马尾藻吸收溶解性无机碳及提升海水 pH 的影响

林庆莹^{1,2,3}, 吴海龙^{1,2,3}, 刘媛媛^{1,2,3}, 于克锋^{1,2,3}, 何培民^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 海洋科学研究院, 上海 201306)

摘要: 探讨了温度、光照强度以及氮、磷加富对瓦氏马尾藻 (*Sargassum vachellianum*) 溶解性无机碳 (DIC) 吸收及提升海水 pH 能力的影响。结果表明: (1) 温度、光照强度对瓦氏马尾藻的 DIC 吸收速率及海水 pH 提升速率影响显著 ($P < 0.05$), 在光照强度 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 瓦氏马尾藻对 DIC 吸收速率和海水 pH 提升速率最大, 分别高达 $82.14 \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和 $0.138 /(\text{g} \cdot \text{h})$, 当环境条件低于或高于这一阈值, 藻体对 DIC 吸收和海水 pH 提升能力均有不同程度的降低; (2) 氮、磷加富能够显著提高瓦氏马尾藻 DIC 吸收及提升海水 pH 能力 ($P < 0.05$), 高氮、磷 (HNP) 组藻体对 DIC 吸收及提升海水 pH 能力均显著高于低氮、磷 (LNP) 组 ($P < 0.05$), 且 N、P 的添加对增加藻体吸收 DIC 及提升海水 pH 的能力具有促进作用。该研究为利用瓦氏马尾藻增殖技术进行近岸富营养化及藻场退化海域生态修复及减缓海洋酸化提供了理论依据。

关键词: 溶解性无机碳; pH; 瓦氏马尾藻; 环境因子

中图分类号: S 968.4 **文献标志码:** A

2007 年 IPCC 的科学评估报告指出海洋是全球碳循环系统重要的“碳汇”, 其固碳总量大约可以达到 3.81 Gt , 海洋表面碳循环过程每年净收支的碳量约为 $1.6 \text{ Gt}^{[1]}$ 。研究表明, 大型海藻及浮游植物共同完成了地球上 90% 的光合作用, 而大型海藻的固碳潜能比浮游植物大得多^[2-3]。DUARTE 和 CHISCANO^[4] 在海藻固碳方面的研究显示, 大型海藻每年固碳量高达 $120 \sim 329 \text{ Mt}$ 。而 CHUNG 等^[5] 对褐藻藻场的实验结果表明, 褐藻规模养殖每年固碳量可达 10 t 。大型海藻光合固碳作用有利于缓解海洋酸化。研究发现, 海洋酸化会严重危害海洋生物, 干扰海洋中最重要的基础生物珊瑚虫以及其他浮游生物的骨骼钙化。另外对鱼类、海胆、头足类的毒性效应都已发生^[6], 所以利用大型海藻固碳效应缓解海洋酸化具有重要的研究意义。近年来, 有关大型海藻生态修复作用已有大量报道, 但修复效应评估多见

于大型海藻对 N、P 营养盐及重金属等的吸收, 而对于大型海藻固碳方面的研究仍较为有限。

瓦氏马尾藻 (*Sargassum vachellianum*) 是我国东南沿海的大型海藻种类, 其研究价值和意义举足轻重^[7]。据调查, 浙江省枸杞岛瓦氏马尾藻野生资源受到严重破坏, 目前, 针对马尾藻海藻场已经开展了修复、重建和研究工作, 研究主要集中在海藻生长及光合作用对环境因子的响应、海藻的人工增殖、藻场的重建及修复等方面^[8-11], 但瓦氏马尾藻光合无机碳吸收方面的研究尚未展开。因此, 本文选择浙江省枸杞岛瓦氏马尾藻藻场生态系统修复作为背景, 研究主要环境因子温度、光照强度及氮磷水平对中国特有大型海藻种类瓦氏马尾藻无机碳吸收及提升海水 pH 能力的影响。为藻场修复后的碳汇效应的评估提供理论依据, 也为海洋“碳汇”对 CO_2 减排和防止海洋酸化作用的评估方法提供数据支撑。

收稿日期: 2017-03-16 修回日期: 2017-08-29

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAC07B03); 国家海洋局公益性行业科研专项 (201105008); 上海海洋大学博士启动基金 (A2-0203-00-100322)

作者简介: 林庆莹 (1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋生态环境保护与修复。E-mail: 1183097084@qq.com

通信作者: 何培民, E-mail: pmhe@shou.edu.cn

1 材料与方 法

1.1 材料及预培养

实验用瓦氏马尾藻取自浙江舟山枸杞岛,采集时间为 2014 年 5 月,低温保存带回,后在上海海洋大学藻类培养室进行预培养。预培养时,挑选健康的新鲜藻体切取顶端藻段 $[(2 \pm 0.1) \text{ cm}]$ 放入盛有 VSE 培养液的 5 L 锥形瓶中进行不同密度的预培养,海藻预培养条件:温度 20 °C,盐度 30,光照强度 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光照周期 12 L:12 D,连续充气,培养过程中每隔 3 d 需添加 1 次 VSE 培养液,并且每隔 6 d 换 1 次新鲜的消毒海水。实验前 2 周培养,供实验用。

1.2 实验设计

实验时选择 50 mL 封闭的透明比色管,加入新鲜的消毒海水和实验前配制的 VSE 培养液,并分别称取 $(0.125 \pm 0.01) \text{ g}$ (预培养结果表明,当培养密度低于 2.5 g/L,生长率无明显变化)生长旺盛的健康藻体盛于比色管中,在以下条件下进行培养,适应性培养 3 d 后,更换新的比色管及培养液,并将藻体生物量减少到初始密度,测定 72 h 内培养液中 DIC 浓度及 pH 的变化情况,其测定方法参照冯子慧等^[12]。

温度实验设置 10、15、20、25、30 °C 共 5 个梯度,光照强度为 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;光照强度实验设置 20、60、100、200、300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 共 5 个梯度,温度为 20 °C;氮、磷加富实验设置 4 个不同 N、P 水平组合,即向自然消毒海水(NaNO_3 浓度约 19 $\mu\text{mol}/\text{L}$, NaH_2PO_4 浓度约 1.3 $\mu\text{mol}/\text{L}$)中 添加不同浓度的氮磷溶液,使其呈现 4 种浓度,高氮磷(HNP):添加 500 $\mu\text{mol}/\text{L}$ NaNO_3 和 30 $\mu\text{mol}/\text{L}$ NaH_2PO_4 ;高氮低磷(HNLP):500 $\mu\text{mol}/\text{L}$ NaNO_3 ;低氮高磷(LNHP):30 $\mu\text{mol}/\text{L}$ NaH_2PO_4 ;低氮磷(LNP):不加 NaNO_3 和 NaH_2PO_4 ,光照强度为 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,温度为 20 °C,实验设计参照李少香等^[13]的研究。每组设置 3 个重复实验,在连续培养 6 h(L)、12 h(L)、24 h(12 L:12

D)、48 h(12 L:12 D)、72 h(12L:12D)后,分别测定培养液中 DIC 浓度及 pH。

1.3 海水溶解无机碳(DIC)及 pH 测定

各组实验过程中,培养液中 DIC 的浓度由 TOC-VCPH 总有机碳分析仪(Shimadzu 公司,日本)测得,其 pH 用 FE 20 数显 pH 计(Mettler Toledo 公司,瑞士)测定。

1.4 数据分析

整理数据并用 Excel 2007 绘制图形,用 OriginPro 8.0 软件进行单因子方差分析(one-way ANOVA),利用 SPSS 19 软件进行 Duncan's 多重比较分析重复实验结果均值的差异显著性,设显著性差异水平为 $P < 0.05$,数据值以平均值 \pm 标准误差($\bar{X} \pm \text{SE}, n = 3$)表示。

2 结果

2.1 不同温度条件对瓦氏马尾藻无机碳吸收能力及提升海水 pH 的影响

图 1a 为不同温度梯度下瓦氏马尾藻培养液中 DIC 浓度的变化。0 ~ 12 h, DIC 浓度显著降低,12 ~ 24 h DIC 浓度重新上升,之后 DIC 浓度的下降幅度逐渐变小。其中,20 °C 实验组 DIC 浓度有显著下降,0 ~ 12 h 的降幅达到 0.48 mmol/L,而 30 °C 实验组降幅最小(0.14 mmol/L),且 72 h 后回升至 2.19 mmol/L,藻体变软且颜色变深,表明藻体不适应 30 °C 高温条件。

图 1b 为不同温度梯度下瓦氏马尾藻培养液中 pH 的变化,可以看出,各实验组培养液 pH 的提升速率与 DIC 浓度的下降速率相对应,且存在正相关性($R^2 = 0.899, n = 25, P < 0.05$),见图 2。其中,0 ~ 12 h,20 °C 实验组的 pH 上升最快,可达到 8.88。12 ~ 24 h 后,各实验组 pH 均有下降,在 24 ~ 48 h 内 30 °C 实验组的 pH 仍为下降趋势,而其他实验组有明显升高,而 48 h 后,其他实验组仍有微小上升趋势,说明该 30 °C 实验组藻体已不适应生存。

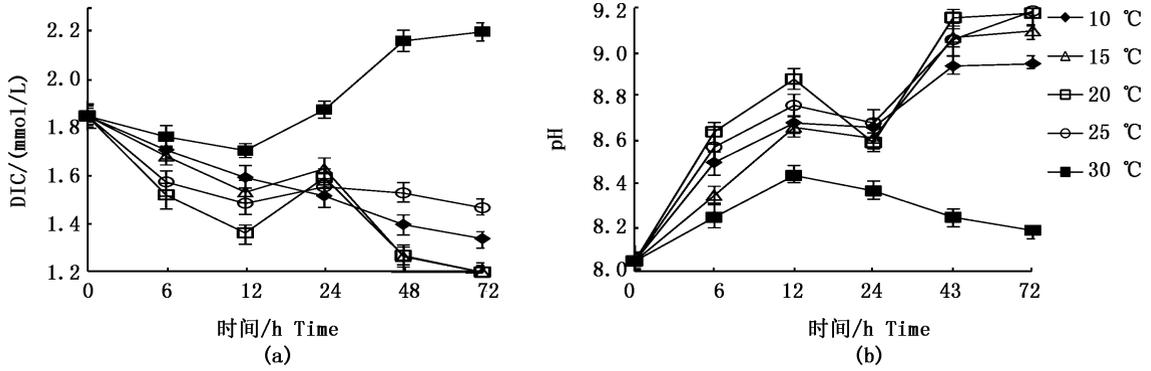


图 1 不同温度条件下瓦氏马尾藻培养液中 DIC 浓度的变化 (a) 及 pH 的变化 (b)

Fig.1 DIC concentration (a) and pH (b) changes in the culture medium of *Sargassum vachellianum* under different temperature conditions with time

各组实验均在 60 μmol/(m²·s) 光强条件下进行,分别在 0、6、12、24 和 48 h 后测定培养液中 DIC 的浓度和 pH。图中误差线为 SD 值(n=3)

The light intensity was 60 μmol/(m²·s), DIC concentration and pH values were measured five times (0, 6, 12, 24 and 48 hours). Error bars = SD (n=3)

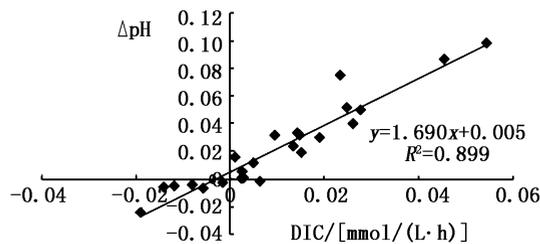


图 2 不同温度条件下 pH 与 DIC 变化速率相关性分析

Fig.2 The correlation analysis of change rates of pH and DIC under different temperature conditions

瓦氏马尾藻无机碳吸收速率显示,0 ~ 12 h 内,前 6 h 无机碳吸收速率最高,与其相比后 6 h 速率存在明显下降,其中 20 °C 和 25 °C 实验组藻体无机碳吸收速率下降幅度与其他实验组存在明显差异(P < 0.05),见表 1。另外,还存在第 2 d 瓦氏马尾藻净固碳速率与第 1 d 相比,明显下降(P < 0.05)的现象。25 °C 和 30 °C 实验组 DIC 浓度均上升,其中 30 °C 实验组上升明显,说明瓦氏马尾藻已对高温不适应(图 1a)。

表 1 12 h 内不同温度梯度对瓦氏马尾藻无机碳吸收速率的影响

Tab.1 Effects of different temperatures on dissolved inorganic carbon absorption rate over 12 hours

固碳速率 / [μmol/(g·h)] Carbon fixation rate	温度 / °C Temperature				
	10	15	20	25	30
0 ~ 6 h	46.83 ± 6.14 ^c	55.48 ± 3.25 ^c	109.05 ± 7.13 ^a	90.95 ± 3.02 ^b	28.57 ± 5.30 ^d
6 ~ 12 h	37.93 ± 5.61 ^b	49.52 ± 3.09 ^a	52.12 ± 6.22 ^a	29.52 ± 4.88 ^{bc}	19.05 ± 6.15 ^c
平均 Average	42.38 ± 5.30 ^c	52.50 ± 2.95 ^b	80.58 ± 5.77 ^a	60.24 ± 4.00 ^b	23.81 ± 5.05 ^d

注:同一行数据上标的字母(a, b, c, d)不同表示存在显著性差异(P < 0.05),表 2 ~ 4 同

Note: Values with different superscripts (a, b, c, d) in the same row mean significantly different (P < 0.05), the same in tab. 2-4

0 ~ 12 h 内,各实验组前 6 h 藻体培养液 pH 的提升速率均大于后 6 h,其中后 6 h 下降幅度较大的是 20 °C 和 25 °C 实验组,与其他实验组存在显著性差异(P < 0.05),而 10 °C 实验组降幅较小且与其他实验组均存在显著性差异(P < 0.05),该现象与 DIC 浓度降低速率相对应,且 20

°C 实验组的 pH 提升速率显著高于其他实验组(P < 0.05),见表 2。另外,第 2 d,各实验组培养液的 pH 提升速率与第 1 d 相比,有明显下降(P < 0.05),且除 30 °C 实验组外,其他各组的 pH 上升差异不显著。

表 2 12 h 内不同温度条件对瓦氏马尾藻提升海水 pH 速率的影响

Tab.2 Effects of different temperatures on the seawater pH elevation rate over 12 hours

pH 提升速率/ $[(g \cdot h)^{-1}]$ Elevation rate	温度/ $^{\circ}C$ Temperature				
	10	15	20	25	30
0 ~ 6 h	0.150 ± 0.016^b	0.100 ± 0.002^c	0.197 ± 0.030^a	0.173 ± 0.019^a	0.067 ± 0.007^d
6 ~ 12 h	0.060 ± 0.007^c	0.090 ± 0.001^a	0.080 ± 0.001^b	0.063 ± 0.005^c	0.063 ± 0.010^c
平均 Average	0.105 ± 0.011^b	0.095 ± 0.001^b	0.138 ± 0.021^a	0.118 ± 0.011^a	0.065 ± 0.005^c

2.2 不同光强条件对瓦氏马尾藻无机碳吸收能力及提升海水 pH 的影响

图 3a 为不同光强实验组瓦氏马尾藻培养液中 DIC 浓度的变化。其中,0 ~ 12 h 内,培养液中 DIC 的浓度明显降低。60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照组 DIC 浓度下降速率最大,第 1 个光照期间(0 ~ 12 h)降幅为 0.49 mmol/L。而 24 ~ 48 h 内,所有实验组培养液的 DIC 浓度均有所下降,但降幅已明显减小。而 48 ~ 72 h 内,除 200 和 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照组出现上升外,其他实验组 DIC 浓度只有微小下降。

图 3b 为不同光强条件对瓦氏马尾藻培养液 pH 变化的影响。其中,各实验组培养液的 pH 上升速率与 DIC 浓度下降速率表现出正相关性($R^2 = 0.733, n = 25, P < 0.05$),见图 4。第 1 天光照期间(0 ~ 12 h),60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照强度下 pH 上升最快,达到 8.87。第 2 光照周期实验结束后,除 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照组 pH 下降外,其余各组 pH 均上升。而第 3 光照周期实验结束后,除 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光强实验组 pH 有微小上升外,其余各组 pH 均下降至 8.21 ~ 9.18 之间。

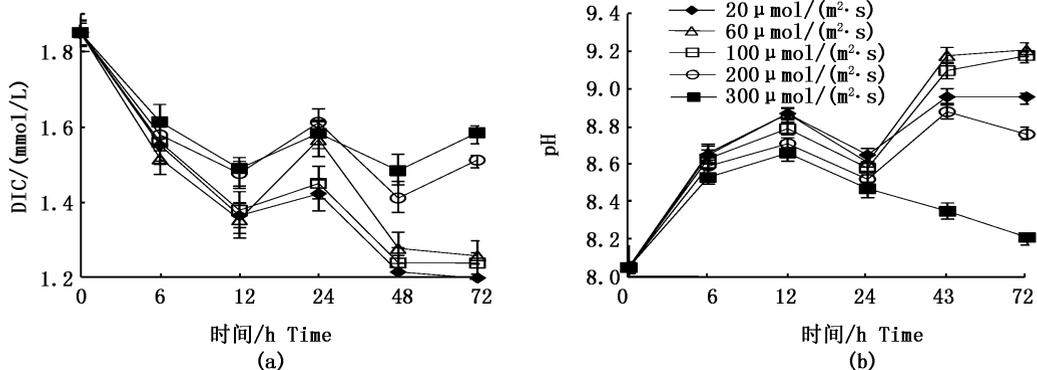


图 3 不同光照强度组瓦氏马尾藻培养液 DIC 浓度变化 (a) 及 pH 变化 (b)

Fig.3 DIC concentration (a) and pH (b) changes in different light intensity groups with time

各实验组均在 20 $^{\circ}C$ 温度条件下进行,并分别在实验后 0, 6, 12, 24 和 48 h 测定培养液中 DIC 浓度和 pH。图中误差线为 SD 值 ($n = 3$)

The experimental temperature was 20 $^{\circ}C$. DIC concentration and pH values were measured over a 48-hour period as a function of five time-points (0, 6, 12, 24 and 48 hour). Error bars = SD ($n = 3$)

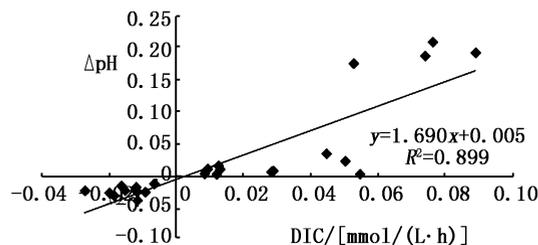


图 4 不同光强度下 pH 与 DIC 变化速率相关性分析

Fig.4 The correlation analysis of change rate of pH and DIC under different light intensity

表 3 为不同光强条件对瓦氏马尾藻无机碳吸收速率的影响,其中,0 ~ 12 h 内,20 和 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 实验组前 6 h 瓦氏马尾藻无机碳吸收速率显著高于其他实验组 ($P < 0.05$),第 1 光照周期(0 ~ 12 h)无机碳平均吸收速率达 80.48 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和 82.14 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$,200 和 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 实验组无机碳平均吸收速率分别为 61.91 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和 59.76 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$,随着光照强度的增强,藻体在第 1 光照周期内无机碳平均吸收速率表现为先升高后降低。

表 3 12 h 内不同光照强度对瓦氏马尾藻无机碳吸收速率的影响

Tab. 3 Effects of different irradiance on dissolved inorganic carbon absorption rate over 12 hours

固碳速率 / [$\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$] Carbon fixation rate	光照强度 / [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] Light intensity				
	20	60	100	200	300
0 ~ 6 h	99.05 \pm 8.39 ^b	110.95 \pm 5.17 ^a	96.43 \pm 8.25 ^b	90.00 \pm 2.76 ^c	78.57 \pm 3.14 ^d
6 ~ 12 h	61.91 \pm 6.22 ^a	53.33 \pm 1.32 ^b	59.77 \pm 2.04 ^a	33.81 \pm 3.38 ^d	40.95 \pm 1.95 ^c
平均 Average	80.48 \pm 6.50 ^{ab}	82.14 \pm 4.07 ^a	78.10 \pm 6.00 ^b	61.91 \pm 3.10 ^c	59.76 \pm 2.58 ^c

表 4 为 12 h 内 5 组不同光强条件下瓦氏马尾藻对海水 pH 提升速率的影响。第 1 天光照期间(0 ~ 12 h), 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 实验组 pH 上升最快, 其提升速率为 0.137/(g · h), 其次是 20

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 实验组, 提升速率达 0.133/(g · h), 显著高于其他组 ($P < 0.05$)。200 和 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 实验组 pH 上升不显著 ($P < 0.05$)。

表 4 12 h 内不同光强条件对瓦氏马尾藻提升海水 pH 速率的影响

Tab. 4 Effects of different light intensity on the seawater pH elevation rate in 12 hours

pH 提升速率 / [(g · h) ⁻¹] Elevation rate	光照强度 / [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] Light intensity				
	20	60	100	200	300
0 ~ 6 h	0.207 \pm 0.029 ^a	0.203 \pm 0.044 ^a	0.193 \pm 0.018 ^b	0.180 \pm 0.057 ^c	0.160 \pm 0.041 ^d
6 ~ 12 h	0.060 \pm 0.016 ^a	0.070 \pm 0.010 ^a	0.053 \pm 0.010 ^b	0.040 \pm 0.018 ^c	0.043 \pm 0.009 ^c
平均 Average	0.133 \pm 0.030 ^a	0.137 \pm 0.029 ^a	0.123 \pm 0.018 ^b	0.110 \pm 0.0037 ^c	0.102 \pm 0.026 ^c

2.3 N、P 加富对瓦氏马尾藻无机碳吸收能力及提升海水 pH 的影响

图 5 为瓦氏马尾藻在 4 组不同 N、P 水平下培养 12 h 后, 各实验组培养液 DIC 浓度及 pH 的变化。结果显示, 培养 12 h 后, HNP 组培养液中 DIC 浓度降幅最大, 由 1.83 mmol/L 降低至 1.15 mmol/L; 其次是 HDLP 组, 降低至 1.32 mmol/L; LNHL 组降低至 1.42 mmol/L; LNP 组 DIC 浓度降幅最小, 为 1.51 mmol/L。实验前后, 不同 N、P 浓度的实验组间培养液的 DIC 浓度变化量存在显著差异 ($P < 0.05$), 见表 5, 其中 LNP 组 DIC 变化量最小, 仅为 0.32 mmol/L; 其次是 LNHP 组 (0.41 mmol/L)、HNLP 组 (0.51 mmol/L); HNP 组 DIC 变化量最大为 0.68 mmol/L, 显著高于其他 3 个组合 ($P < 0.05$)。说明 N、P 加富对瓦氏马尾藻无机碳吸收具有促进作用。

图 5 显示, 实验前后培养液 pH 的变化与 DIC 浓度变化相对应, 其中, HNP 组 pH 为 9.25, 达到最高值; 其次是 HNLP (9.02)、LNHP (8.93); LNP 组 pH 最低, 为 8.69。另外, 4 组不同 N、P 浓度组合实验前后其培养液的 pH 变化量差异显著 ($P < 0.05$), HNP 组 pH 变化量最大, 为 1.20, 显著高于其他实验组 ($P < 0.05$); 其次是 HNLP 组

(0.97)、LNHP 组 (0.88); LNP 组 pH 变化量与其他实验组相比显著降低 ($P < 0.05$), 仅为 0.64。说明 N、P 加富除了可以促进瓦氏马尾藻吸收海水中的 DIC 外, 还相应地提升了海水的 pH, 且 N、P 的添加对增加藻体吸收 DIC 及提升海水 pH 的能力具有促进作用。

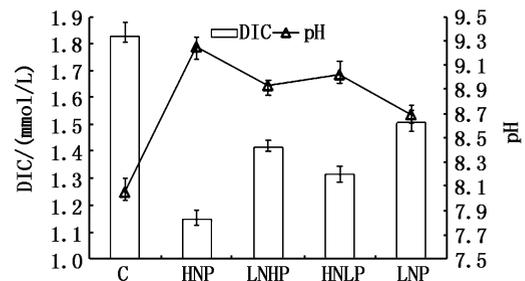


图 5 不同 N、P 水平对瓦氏马尾藻吸收海水中 DIC 及提升海水 pH 影响

Fig. 5 Effect of different nitrogen (N) and phosphorous (P) levels on dissolved inorganic carbon (DIC) uptake and seawater pH elevation of *Sargassum vachellianum*

图中的误差线为 SD 值 ($n = 3$), 横坐标中的“C”表示实验前各培养液中的 DIC 浓度及 pH

Error bars represent standard deviation ($n = 3$). C represents the DIC concentration and seawater pH before the experiment

表 5 实验前后海水 DIC 及 pH 变化量
Tab. 5 The change in the dissolved inorganic carbon (DIC) concentrations and pH levels in the culture solution over the experimental period

N、P 水平 Level	HNP	LNHP	HNLP	LNP
Δ DIC / (mmol/L)	0.68 ± 0.020 ^a	0.41 ± 0.021 ^c	0.51 ± 0.017 ^b	0.32 ± 0.020 ^d
Δ pH	1.20 ± 0.032 ^a	0.88 ± 0.027 ^b	0.97 ± 0.035 ^b	0.64 ± 0.029 ^c

注:表中测定数值为平均值 ± 标准差($n=3$),同行左上角标注的小写字母(a, b, c, d)表示不同 N、P 水平下 Δ DIC 和 Δ pH 差异显著($P < 0.05$)

Note: Values with different lower case superscripts in the same row are significantly different ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 温度变化对瓦氏马尾藻无机碳吸收能力及提升海水 pH 的影响

温度作为最普遍的气候因素影响所有生物的生理过程,有研究表明,温度能控制植物光合作用利用无机碳的速率,并起到主要作用^[14]。本文在不同温度条件对瓦氏马尾藻光合吸收无机碳及提高海水 pH 的能力进行了研究,结果表明,随着温度的升高,藻体的无机碳吸收速率和提升海水 pH 的速率均在 20 °C 组出现最大值,且总体趋势为先增加后降低。0 ~ 12 h 中,与前 6 h 相比较,后 6 h 藻体的无机碳吸收速率有所降低,且第 2 天藻体的吸收速率与第 1 天相比也有显著下降。这与 DIC 浓度的下降有关,海水中 DIC 的主要存在形式为 HCO_3^- ($\approx 40\%$) 和 CO_3^{2-} ($\approx 60\%$)^[15],因海藻在短时间内快速吸收,使得 HCO_3^- 含量快速下降且比例降低,在没有外源 CO_2 补充的情况下,如果延长实验的时间,海藻对无机碳的吸收能力将会受到影响^[13]。24 h 后,30 °C 实验组 DIC 浓度上升,pH 明显下降,且培养 48 h 后藻体已开始出现变软和颜色变深的现象,该现象的出现表明藻体已经不能适应此时的培养温度,该温度已超过藻体的耐受范围。李少香^[13]对浒苔的研究也表明,随着温度的升高,浒苔对无机碳的吸收速率和培养液中 pH 的提升速率表现出先升高后降低的趋势,其中 35 °C 高温组浒苔出现近半数发白的现象,表明该温度已明显超过藻体的适应范围。研究表明,温度可以通过影响藻体内光合色素的含量间接影响藻体对无机碳的吸收速率,张建伟等^[16]的研究中,随温度的升高,瓦氏马尾藻的多种光合色素均呈现下降趋势,这也可能就是引起其无机碳吸收速率及 pH 提升速率下降的原因,具体机理还需进一步研

究。因此,在一定温度范围内,升高温度能够促进瓦氏马尾藻对 DIC 的吸收,当温度超过一定范围,瓦氏马尾藻无机碳吸收及提升海水 pH 的能力将受到抑制。

3.2 光强变化对瓦氏马尾藻无机碳吸收能力及提升海水 pH 的影响

光照是海藻生长发育必不可少的因素,大型海藻通过光合作用实现 C、N、P 的吸收。张建伟等^[16]研究表明,光照强度能显著影响瓦氏马尾藻的生长状况,该结论与杨彬等^[17]对莫氏马尾藻的研究结果相似。本文开展了不同光强条件对瓦氏马尾藻光合无机碳吸收和提升海水 pH 能力的研究,结果表明光照 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 实验组的无机碳吸收速率和 pH 提升速率均最快,但随光照强度的不断增加,瓦氏马尾藻的无机碳吸收速率也下降,尤其是光照 200 和 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 实验组的吸收速率有显著下降,这主要因为随着培养液中 DIC 浓度的下降,高 pH 的环境使得 CO_2 的含量急剧下降,且无外源 CO_2 补充的情况下, CO_2 扩散速度很慢^[18],故其代谢不能与光吸收同步,成为最主要的限制因子。该结果同样出现在李少香^[13]对浒苔的研究中,光照强度在 20 ~ 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间,藻体在第一光照期间内无机碳吸收速率先增加后下降,且各实验组之间存在明显差异。另外,王巧晗等^[19]对孔石莼的研究中表明,其化学组成中 C 元素的含量会受到光强的显著影响,达到一定光强时,C 元素含量会显著上升,后随光强的增强,C 元素含量会明显下降。可见光照强度变化会显著影响藻体对无机碳的吸收。另外因为光能超过了藻体光合系统所能利用的光能值,发生了光抑制现象,进而使得藻体的光合功能下降,无机碳吸收速率下降^[20]。这种现象在对其他藻类的研究中也已被证实,有研究表明,龙须菜 (*Gracilaria lemaneiformis*)

在自然生长环境条件下,随光照强度的增加,海水表面较强的太阳辐射使其产生了光抑制现象,进而导致藻体生长及光合速率的下降^[21-23],从而影响藻类对海水中无机碳的吸收。因此,瓦氏马尾藻的营养吸收和生长过程受到光照强度的显著影响,在低光强时,随光强升高,瓦氏马尾藻营养吸收和生长速率加快,当光强超过一定阈值,进一步提高增强光强,藻体的生长和光合固碳作用均受到抑制。

3.3 N、P 加富作用对瓦氏马尾藻无机碳吸收能力及提升海水 pH 的影响

N、P 作为大型海藻生长的主要营养盐成分, N 是藻类光合器官的重要合成元素,藻体的光合固碳效应对 N 含量的供给反应敏感, P 是藻细胞核酸和膜的主要成分,同时也是组成 ATP 的基本元素,所以 N、P 对海藻的生理生化过程有着至关重要的作用^[13]。李枫等^[24]对龙须菜的研究中表明,高 N 高 P 处理条件下,龙须菜的生长和光合固碳能力比高 N 低 P、低 N 高 P、低 N 低 P 均高。本文开展了瓦氏马尾藻无机碳吸收能力及提升海水 pH 对不同 N、P 加富处理的响应研究,结果显示,各实验组 DIC 浓度变化量和提升海水 pH 的变化量均存在显著性差异。此现象说明 N、P 加富均有利于促进瓦氏马尾藻的光合固碳能力的提高。藻类光合作用吸收 CO₂ 同时消耗营养盐,所以适当增加营养盐的浓度可促进藻体对 CO₂ 的吸收,进而影响海水中的无机碳体系^[13]。韩婷婷^[25]研究表明,N 加富促进了海带生长率的提高和光合固碳能力的增强,使得其培养液中 DIC 的含量加速下降。这样的结果也出现在徐永健等^[26]对圆扁江蓠的研究中,在 N 浓度较高的介质中,藻体的光合速率增加,生长速率也相应增加。且 HNLP 组相比 LNHP 组对海水 DIC 浓度和 pH 的影响更大,说明 N 加富比 P 加富对马尾藻光合吸收无机碳能力的影响更大。该研究结果与李少香^[13]对浒苔的研究一致,N、P 加富对促进浒苔的光合固碳吸收海水中的无机碳效果显著,且 N 加富的促进效果强于 P 加富。邹定辉等^[27]对石莼的研究也证明藻体对 P 的需求小于 N。有研究表明,相同条件下生长的坛紫菜,培养海水的营养盐浓度升高,会增大藻体的 *Chl. a* 含量^[28]。PEDERSEN^[29]对石莼和线性硬毛藻的研究也表明,N 加富使藻体内的叶绿素含量增加,提

高藻体的最大光合作用速率,从而增强藻体无机碳吸收能力。研究发现,在缺 P 的情况下,细基江蓠变种的藻胆蛋白和叶绿素含量都比平常环境中低^[30]。因此,N、P 营养盐影响瓦氏马尾藻的光合固碳能力可能是通过影响藻体的光合色素和体内蛋白等的正常代谢来发挥作用的,但具体机理仍需深入研究。氮、磷加富能够显著提高瓦氏马尾藻光合作用吸收无机碳的能力,从而降低了海水 DIC 的浓度,促进海洋不断吸取空气中的 CO₂。瓦氏马尾藻的光合及无机碳吸收作为复杂的生理过程,除温度、光照强度和 N、P 营养盐浓度外,其光合无机碳吸收及提升海水 pH 的能力必然还受到藻体密度和其他生态因子等的影响,今后还需对该过程进行深入的研究。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] PACKER M. Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy [J]. Energy Policy, 2009, 37(9): 3428-3437.
- [3] LI Y Q, HORSMON M, WU N, et al. Biofuels from microalgae [J]. Biotechnology Progress, 2008, 24(4): 815-820.
- [4] DUARTE C M, CHISCANO C L. Seagrass biomass and production: a reassessment [J]. Aquatic Botany, 1999, 65(1/4): 159-174.
- [5] CHUNG I K, OAK J H, LEE J A, et al. Installing kelp forests/seaweed beds for mitigation and adaptation against global warming: Korean Project Overview [J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 70(5): 1038-1044.
- [6] 陈清华, 彭海君. 海洋酸化的生态危害研究进展 [J]. 科学导报, 2009, 27(19): 108-111.
CHEN Q H, PENG H J. Ecological impact of ocean acidification [J]. Science & Technology Review, 2009, 27(19): 108-111.
- [7] 张建伟, 刘媛媛, 吴海龙, 等. 环境因子对瓦氏马尾藻生长及光合作用的影响 [J]. 中国水产科学, 2014, 21(6): 1227-1235.
ZHANG J W, LIU Y Y, WU H L, et al. Effects of different environmental factors on growth and photosynthesis of *Sargassum vachellianum* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(6): 1227-1235.
- [8] 张婧. 瓦氏马尾藻与铜藻的室内人工培育 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.

- ZHANG J. Indoor cultivation of the brown alga *Sargassum vachellianum* and *Sargassum horneri*: morphological observation and techniques of artificial seeding [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [9] CHAI Z Y, HUO Y Z, HE Q, et al. Studies on breeding of *Sargassum vachellianum* on artificial reefs in Gouqi Island, China[J]. *Aquaculture*, 2014, 424-425: 189-193.
- [10] 徐金根, 陈素文, 张汉华, 等. 温度和光照对瓦氏马尾藻繁殖的影响[J]. *广东农业科学*, 2013, 40(9): 121-123, 128.
- XU J G, CHEN S W, ZHANG H H, et al. Effect of light and temperature on reproduction of *Sargassum vachellianum* [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(9): 121-123, 128.
- [11] 柴召阳, 霍元子, 于克锋, 等. 枸杞岛瓦氏马尾藻藻场生态系统健康评价[J]. *海洋环境科学*, 2013, 32(3): 386-389.
- CHAI Z Y, HUO Y Z, YU K F, et al. Assessment of *Sargassum vachellianum* bed ecosystem health in Gouqi Island [J]. *Marine Environmental Science*, 2013, 32(3): 386-389.
- [12] 冯子慧, 孟阳, 陆巍, 等. 绿潮藻浒苔光合固碳与防治海水酸化的作用 I. 光合固碳与海水 pH 值提高速率研究[J]. *海洋学报*, 2012, 34(2): 162-168.
- FENG Z H, MENG Y, LU W, et al. Studies on photosynthesis carbon fixation and ocean acidification prevention in *Ulva prolifera* I. Rate of photosynthesis carbon fixation and seawater pH increase [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(2): 162-168.
- [13] 李少香. 浒苔光合固碳影响因子及海区评估研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
- LI S X. Studies on influencing factors of photosynthetic carbon fixation and evaluation of sea area by *Ulva prolifera* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014.
- [14] 黄瑶, 毛玉泽, 周毅, 等. 添加氮磷对龙须菜光合固碳能力影响的现场研究[J]. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 22-30.
- HUANG Y, MAO Y Z, ZHOU Y, et al. Field study on photosynthetic carbon acquisition of *Gracilaria lemaneiformis* after adding nitrogen and phosphorus[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 22-30.
- [15] RIVERS J S, PECKOL R. Interactive effects of nitrogen and dissolved inorganic carbon on photosynthesis, growth, and ammonium up take of the macroalgae *Cladophora vagabunda* and *Gracilaria tikvahiae* [J]. *Marine Biology*, 1995, 121(4): 747-753.
- [16] 张建伟, 刘媛媛, 吴海龙, 等. 环境因子对瓦氏马尾藻生长及光合作用的影响[J]. *中国水产科学*, 2014, 21(6): 1227-1235.
- ZHANG J W, LIU Y Y, WU H L, et al. Effects of different environmental factors on growth and photosynthesis of *Sargassum vachellianum* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(6): 1227-1235.
- [17] 杨彬, 谢恩义, 曲元凯. 不同环境因子对莫氏马尾藻幼苗生长和光合色素的影响[J]. *南方水产科学*, 2013, 9(4): 39-44.
- YANG B, XIE E Y, QU Y K. Effects of different environment factors on the growth and photosynthetic pigments of seedlings of *Sargassum mclurei* [J]. *South China Fisheries Science*, 2013, 9(4): 39-44.
- [18] 程丽巍. 三种大型海藻对海水中营养盐供应变化的生理响应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- CHENG L W. Study on the physiological responses of three marine macroalgae to the change of nutrients supplies in seawater [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [19] 王巧晗, 董双林, 田相利, 等. 光照强度对孔石莼生长和藻体化学组成的影响[J]. *海洋科学*, 2010, 34(8): 76-80.
- WANG Q H, DONG S L, TIAN X L, et al. The effects of light intensity on the growth and chemical constituents of *Ulva pertusa* [J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(8): 76-80.
- [20] 潘瑞炽, 王小菁, 李娘辉. 植物生理学[M]. 7版. 北京: 高等教育出版社, 2012: 110-114.
- PAN R C, WANG X J, LI N H. *Plant physiology* [M]. 7th ed. Beijing: Higher Education Press, 2012: 110-114.
- [21] XU J T, GAO K S. Growth, pigments, UV-absorbing compounds and agar yield of the economic red seaweed *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) grown at different depths in the coastal waters of the South China Sea [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2008, 20(5): 681-686.
- [22] 郑兵. 深澳湾环境因子的变化特征与龙须菜养殖的生态效应[D]. 汕头: 汕头大学, 2009.
- ZHENG B. Variation characteristics of environmental factors and ecological effects of *Gracilaria lemaneiformis* in Shen'ao Bay, Eastern Coast of Guangdong [D]. Shantou: Shantou University, 2009.
- [23] 蒋雯雯. 环境因子对菊花江蓠和细基江蓠繁枝变型生理生态学影响的比较研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- JIANG W W. A Comparative study on the effects of environmental conditions on the physiological ecology of *Gracilaria lichenoides* and *G. tenuistipitata* var. *liui* [D]. Qingdao: China Ocean University, 2010.
- [24] 李枫, 邹定辉, 刘兆普, 等. 氮磷水平对龙须菜生长和光合特性的影响[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1140-1147.
- LI F, ZOU D H, LIU Z P, et al. Effects of nitrogen and phosphorous levels on growth and photosynthetic traits of *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodo-Phyta) [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(6): 1140-1147.
- [25] 韩婷婷. 大型海藻对不同 CO₂ 浓度的光合生理响应及其生态效应[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.

- HAN T T. Photosynthetic physiological responses of macroalgae to different CO₂ concentrations and their ecological effects [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [26] 徐永健, 钱鲁闽, 焦念志. 江蓠作为富营养化指示生物及修复生物的氮营养特性[J]. 中国水产科学, 2004, 11(3): 276-280.
- XU Y J, QIAN L M, JIAO N Z. Nitrogen nutritional character of *Gracilaria* as bioindicators and restoral plants of eutrophication [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004, 11(3): 276-280.
- [27] 邹定辉, 高坤山, 阮祚禧. 高 CO₂ 浓度对石莼光合作用及营养盐吸收的影响[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(6): 877-882.
- ZOU D H, GAO K S, RUAN Z X. Effects of elevated CO₂ concentration on photosynthesis and nutrients uptake of *Ulva lactuca*[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31(6): 877-882.
- [28] 查毅. 基于生物修复的两种大型经济海藻营养盐吸收和光合作用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- ZHA Y. Study on nutrient uptake and photosynthesis of two large seaweeds based on bioremediation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [29] PEDERSEN M F. Nitrogen limitation of photosynthesis and growth: comparison across aquatic plant communities in a Danish estuary (Roskilde Fjord) [J]. Ophelia, 1995, 41(1): 261-272.
- [30] 许忠能, 林小涛, 林继辉, 等. 营养盐因子对细基江蓠繁枝变种氮、磷吸收速率的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 366-374.
- XU Z N, LIN X T, LIN J H, et al. The effects of nutrient availability on the uptake of nitrogen and phosphorus by *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* Zhang et Xia[J]. Journal of Ecology, 2002, 22(3): 366-374.

The effects of environmental factors on dissolved inorganic carbon absorption and increasing pH abilities of *Sargassum vachellianum*

LIN Qingying^{1,2,3}, WU Hailong^{1,2,3}, LIU Yuanyuan^{1,2,3}, YU Kefeng^{1,2,3}, HE Peimin^{1,2,3}

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Water Environment and Ecology Engineering Center of Shanghai Institute of Higher Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Marine Scientific Research Institute, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: We studied the effects of different temperatures, light intensity, nitrogen (N) and phosphorus (P) on the absorption of dissolved inorganic carbon (DIC) and pH-improving rate of *Sargassum vachellianum*. The results showed that: 1) Temperature and light intensity all had a significant effect on the DIC sequestration and pH-improving capability of *S. vachellianum* ($P < 0.05$). *S. vachellianum* shows the highest DIC sequestration [$82.14 \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$] and pH-improving capability [$0.138/(\text{g} \cdot \text{h})$] when cultured at 20 °C and at a light intensity of $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. When the environmental conditions are below or above this threshold, the DIC sequestration and pH-improving capability of *S. vachellianum* appeared different degree reduction. 2) N and P enrichment could dramatically increase the DIC sequestration and pH-improving capability of *S. vachellianum* ($P < 0.05$). The HNP group had significantly higher DIC sequestration and pH-improving capability than that of LNP group ($P < 0.05$), and the addition of N and P showed strong complementary effects on improving the DIC absorption and pH-improving rate of *S. vachellianum*. The results could provide theoretical basis for the bioremediation and acidification mitigation by *S. vachellianum* cultivation in coastal eutrophication waters.

Key words: dissolved inorganic carbon; pH; *Sargassum vachellianum*; environmental factors