

DOI: 10.12264/JFSC2023-0271

枸杞岛潮间带和筏架定生铜藻生长差异

王惠杰¹, 杨起帆¹, 朱伟栋¹, 苗航¹, 毕远新^{1, 2, 3}

1. 浙江海洋大学海洋与渔业研究所, 浙江 舟山 316021;

2. 浙江省海水增殖重点实验室, 浙江 舟山 316021;

3. 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室, 浙江 舟山 316021

摘要: 为解析潮间带和筏架定生铜藻(*Sargassum horneri*)生长差异及成因, 于 2022 年 9 月至 2023 年 6 月, 在枸杞岛潮间带和筏架铜藻生命周期内, 每月采集潮间带和筏架铜藻, 结合生命周期内每月温度和光强变化情况, 分析潮间带和筏架铜藻株高、湿重和最长初生分枝长度生物学参数的变化, 以及生长所需的有效积温差异, 并探讨温度和光强对铜藻生长的影响。研究发现, 筏架铜藻的平均株高、湿重和最长初生分枝长度最大值分别为(168.1±21.0) cm、(147.6±24.1) g 和(131.8±26.4) cm, 远大于潮间带铜藻的(67.9±22.5) cm、(62.4±16.7) g 和(46.4±10.6) cm。进入繁殖期前, 同一月份筏架铜藻湿重、株高和最长初生分枝长度增长速率远大于潮间带铜藻, 筏架铜藻生长迅速, 潮间带铜藻生长则较为缓慢。9 ℃左右的低温条件不是抑制铜藻生长的限制参数, 而 35 μmol/(m²·s)左右稳定的光强可能是造成筏架铜藻生长所需有效积温远小于潮间带铜藻, 筏架铜藻繁殖时间比潮间带铜藻早 1~2 个月, 以及筏架铜藻生长速率远大于潮间带铜藻的关键因素。枸杞岛附近海域的极大部分漂浮铜藻可能来源于枸杞岛的筏架定生铜藻。上述研究结果阐明了筏架铜藻的株高、湿重和最长初生分枝长度的生长速率远快于潮间带铜藻, 探究出光强是影响潮间带和筏架铜藻生长与繁殖的关键环境因子, 可为研究枸杞岛附近海域的漂浮铜藻来源、铜藻培育提供科学依据。

关键词: 铜藻; 潮间带; 筏架定生; 生物学参数; 温度; 有效积温; 光强

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)11-1364-10

铜藻隶属于褐藻门(*Phaeophyta*), 马尾藻属(*Sargassum*), 是北太平洋西部特有暖温带性藻种^[1], 固着器呈裂瓣状, 拥有固着器可以定生生长, 密集的气囊结构使其能漂浮于海面^[2]。生长于浙江省枸杞岛海域的定生铜藻, 定生生长在岩礁和贻贝养殖筏架上, 每年秋冬季开始生长, 翌年春季进入繁盛期。而植物完成其生命周期, 需要一定的积温, 即要求一定量的日平均温度的累积。目前, 关于铜藻生长与有效积温关系研究较少, 李训猛等^[3]首次从有效积温角度探究枸杞岛潮下带铜藻生长季节特性变化情况, 发现潮下带铜藻株

高和生物量与有效积温变化关系有着明显差异。但上述研究只探究了潮下带铜藻生长与有效积温的关系, 对潮间带和筏架铜藻生长与有效积温的关系尚不清楚, 而且上述研究并未揭示温度和光强对铜藻生长的影响。因此, 有必要探究潮间带和筏架铜藻生长与有效积温变化的关系及温度和光强对铜藻生长的影响。

适宜的温度与太阳辐射是植物生命活动不可或缺的条件之一, 海洋藻类的代谢、性成熟、生长发育及数量分布都与温度、太阳辐射有着密切联系^[4]。目前, 关于温度和光强对底栖和筏架铜藻

收稿日期: 2023-10-10; 修订日期: 2023-11-21.

基金项目: 浙江省科技厅基础公益项目(LTGS24C030002); 浙江省科技厅重点研发项目(2023C03120); 舟山市科技计划项目(2022C31054).

作者简介: 王惠杰(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为大型海藻生态修复. E-mail: 1813765026@qq.com

通信作者: 毕远新, 高级工程师, 研究方向为大型海藻生态修复. E-mail: byx369@163.com

生长的影响研究,主要集中在生长适宜的温度和光强上。关于生长适宜温度方面,王丽梅等^[5]调查发现大连旅顺盐场海区筏架断枝铜藻幼苗的生长适宜水温为 15~25 °C,而孙建璋等^[6]分析得出南麂列岛底栖铜藻生长和繁殖适温为 11~16 °C。关于生长适宜光强方面,栾青等^[7]通过实验得出山东荣成海域筏架铜藻在 200~300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光强时,生长速率最快,而毕远新等^[8]通过研究枸杞岛底栖铜藻生长变化,发现 248 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的光强为铜藻快速生长提供了有利条件。这些研究仅表明底栖铜藻生长适宜的温度和光强与筏架铜藻有着明显差异,并未探究出影响潮间带和筏架铜藻生长与繁殖的关键环境因子(温度或者光强)。因此,在潮间带和筏架铜藻生命周期中逐月探究温度和光强对两者生长的影响具有重要意义。

定生铜藻在物理、生物等条件下,藻体断裂或固着器脱离附着基质,漂浮于海面形成了漂浮铜藻^[9]。一旦环境条件适宜漂浮铜藻生长,其强大的营养生长能力,可能会造成暴发式增殖从而引发“金潮”^[10]。近年来,北太平洋沿海岸域发生了多次大规模的漂浮铜藻聚集形成“金潮”侵入事件,远至墨西哥湾、美国加利福尼亚等海域均有漂浮铜藻出现的报道^[11-12],但漂浮铜藻主要发生在中国、日本、韩国等国沿海岸域^[13-15],有研究称,2017年侵入韩国济州岛并对当地环境造成一定程度危害的漂浮铜藻是源于中国舟山海域^[16-17]。而丁晓玮等^[18]通过对长江口附近海域漂浮金潮进行月度监测,发现舟山枸杞岛附近海域的漂浮铜藻群规模巨大,面积达到约 112 km^2 ,主要集中在贻贝养殖区附近。目前枸杞岛的贻贝养殖面积约为 11.2 km^2 ,在贻贝养殖筏架上定生生长着大量的铜藻,据推算 9 月幼苗期生物量约为 3800 万株。当渔民采收贻贝或受到风浪等外在因素的干扰时,大量筏架定生铜藻会断裂并脱离附着基,一旦脱落后漂在海上,极容易形成大量漂浮铜藻群。底栖铜藻脱离附着基也可能会形成漂浮铜藻,但孙建璋等^[9]调查时发现底栖铜藻分布面积和数量逐年减少。枸杞岛岛礁周边底栖铜藻分布较少,数量稀少的底栖铜藻似乎不足以形成大规模

的漂浮铜藻群。枸杞岛附近海域的“金潮”具体来源尚不清楚,有必要从潮间带和筏架定生铜藻的生长变化加以解析。

本研究通过研究枸杞岛潮间带和筏架铜藻生物学参数变化及所需的有效积温差异,并结合温度和光强对潮间带和筏架铜藻生长的影响,以期揭示枸杞岛潮间带和筏架铜藻生命周期中的生长变化差异,解析造成潮间带和筏架铜藻生长差异的成因,为解释枸杞岛附近海域的漂浮铜藻来源以及铜藻培育相关研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及站点选择

枸杞岛(30°41'N~30°44'N, 122°44'E~122°48'E)位于浙江省舟山市嵊泗县马鞍列岛,岛礁周边底栖铜藻分布较少。枸杞岛北面分布有大量的贻贝养殖区,受人为活动的影响较大,在贻贝养殖筏架上定生生长着大量的铜藻,南面贻贝养殖活动较少^[3]。根据当地环境条件等因素,分别选定了潮间带和筏架铜藻的采样站点。筏架定生铜藻采样站点 S1 (30°43'27"N, 122°45'38"E)位于水下 0.6 m 左右的贻贝养殖区筏架苗绳上,潮间带铜藻采样站点 S2 (30°43'8"N, 122°45'29"E)位于枸杞岛北面一处潮间带礁石上(图 1)。

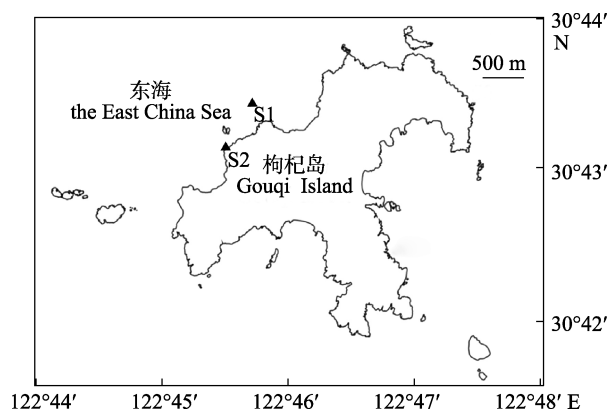


图 1 采样站点示意图

S1: 筏架铜藻采样站点; S2: 潮间带铜藻采样站点。

Fig. 1 Sketch map of sampling stations
S1: raft *Sargassum horneri* sampling station; S2: intertidal zone *Sargassum horneri* sampling station.

1.2 样本采集及数据收集

7、8 月末大潮水期间, 前往潮间带 S2 站点观察采样, 发现此时潮间带铜藻过小, 未进行采样。故本研究于铜藻生命周期中的 2022 年 9 月到 2023 年 6 月(2023 年 6 月, 筏架铜藻已经死亡, 未进行

采样, 只采集了潮间带铜藻)每月末大潮水期间, 在筏架 S1 站点随机采集 1 条 10 m 筏绳上的所有定生铜藻(包含固着器)(图 2a), 保留其中 15 株大小适中的铜藻; 在潮间带 S2 站点随机采集 30 株定生铜藻(包含固着器)(图 2b)。



图 2 铜藻样本采集

a. 筏架定生铜藻; b. 潮间带定生铜藻。

Fig. 2 *Sargassum horneri* sample collection

a. Raft *Sargassum horneri*; b. Intertidal zone *Sargassum horneri*.

铜藻株高为铜藻固着器到主干生长点的高度, 采用直尺(精度 0.1 cm)测量铜藻株高和最长初生分枝的长度; 湿重采用电子秤(精度 0.1 g)测量, 采用水下温度光照度记录仪(Onset HOBO MX2202, 美国)每 10 分钟测量并记录潮间带和筏架站点的温度和光强。

1.3 数据处理与分析

描述性统计值采用平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)表示(光强只计算有光照的数值), 采用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)。有效温度是指活动温度与生物学下限温度的差值, 生命周期内有效温度的总和即为有效积温^[20](本研究有效积温从铜藻幼苗阶段 9 月到次年铜藻衰败阶段)。本研究铜藻生物学下限温度及上限温度分别取值 7.1 °C 和 25.0 °C^[19]。有效积温 K 计算表达式为:

$$K = N(T - C) \quad (1)$$

式中, K 为有效积温, N 为发育历期, 即生长发育所需时间, T 为发育期间平均温度, C 为发育起点温度(下限温度)。

2 结果与分析

2.1 温度、有效积温与光强的季节变化规律

铜藻生命周期内, 如图 3a~3c 所示, 同一月

份潮间带和筏架铜藻整体上温度、有效积温和光强变化趋势相似。9 月枸杞岛潮间带和筏架的温度为 25~26 °C, 随后潮间带和筏架的温度持续下降, 2 月潮间带和筏架的温度最低, 下降到 9 °C 左右(图 3a), 3 月开始回暖, 随后温度持续上升, 6 月达到 21~22 °C, 温度整体上呈先下降后上升的趋势。随着温度的变化, 有效积温逐渐累积(图 3b), 潮间带铜藻累计有效积温从 9 月的 560.4 °C·d 增长至翌年 6 月的 3096.8 °C·d; 筏架铜藻累计有效积温从 9 月的 556.8 °C·d 增长至翌年 5 月的 2579.6 °C·d。由图 2b 可知, 潮间带和筏架铜藻有效积温变化趋势相似, 9—11 月温度逐渐降低, 有效积温增长率随之减小, 12—2 月温度继续降低, 此时有效积温增长率处在整个生命周期内最低水平, 3—6 月温度持续升高, 有效积温增长率随之增大。

不同于有效积温, 铜藻生命周期内光强的变化起伏则较大。由图 3c 可知, 潮间带铜藻在 9—2 月时, 月平均光强持续降低, 2 月光强最低, 为 9.7 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 3、4 月光强快速增大, 4 月光强最高, 为 64.1 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 5、6 月光强稍有降低。而筏架铜藻在 9—2 月时, 除 1 月光强稍有增加外, 其余月份光强持续降低, 2 月光强最低, 为 6.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

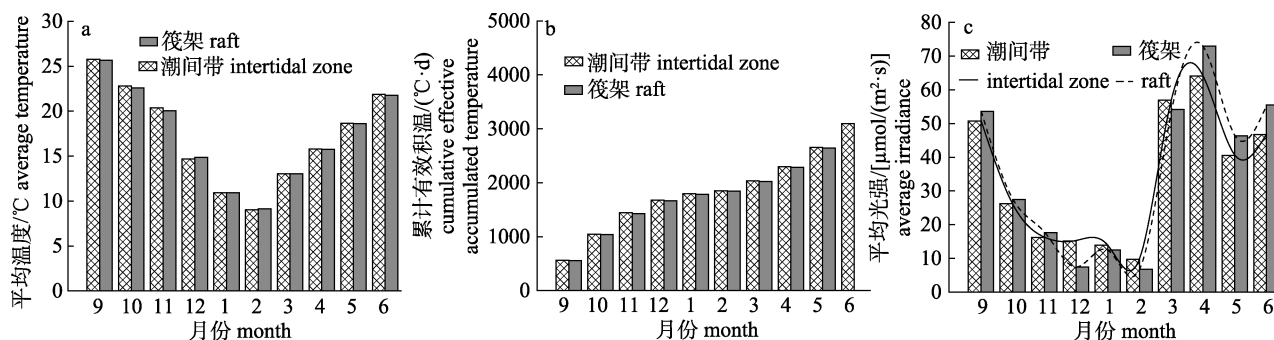


图 3 环境参数逐月变化

a. 潮间带和筏架月平均温度变化; b. 潮间带和筏架铜藻有效积温变化; c. 潮间带和筏架月平均光强变化。

Fig. 3 Monthly variation of selected environment traits

a. Intertidal zone and raft monthly mean temperature variations; b. Effective temperature variation of intertidal zone and raft *Sargassum horneri*; c. Intertidal zone and raft monthly mean irradiance variations.

3、4月光强快速增大, 4月光强达到峰值为 $73 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$; 5、6月光强呈下降趋势。

2.2 潮间带和筏架铜藻生长的季节变化

在潮间带和筏架铜藻生命周期内, 由图 3 和图 4 可知, 9—11 月, 潮间带和筏架温度较高为 $20\sim 25^\circ\text{C}$, 有效积温增长快, 光强较高, 适宜潮间带和筏架铜藻早期幼孢子体萌发和生长。12—2 月, 温度、光强处于生命周期内最低水平, 潮间带铜藻生长缓慢, 筏架铜藻仍然能够以相对较高的增长速率生长。3—6 月, 潮间带和筏架温度和光强受气温影响持续回升, 潮间带铜藻进入快速生长期, 4 月部分藻体出现少量生殖托, 5 月末大多

藻体出现生殖托并成熟, 6 月末大部分藻体刚进入衰老凋亡阶段(图 5a), 极小部分藻体已经死亡(图 5b); 筏架铜藻 3 月大部分藻体出现生殖托, 4 月生殖托成熟, 5 月末衰败严重(图 5c), 6 月基本死亡(图 5d)。筏架铜藻繁殖时间比潮间带铜藻早 1~2 个月。

逐月采集枸杞岛潮间带和筏架铜藻样本, 测定株高、湿重和最长初生分枝长度生物学参数(表 1、表 2)。如图 4 所示, 潮间带和筏架铜藻个体株高、湿重和最长初生分枝长度均具有明显的季节变动规律, 同一月份筏架铜藻株高、湿重和最长初生分枝长度显著高于潮间带铜藻($P<0.05$)。潮间

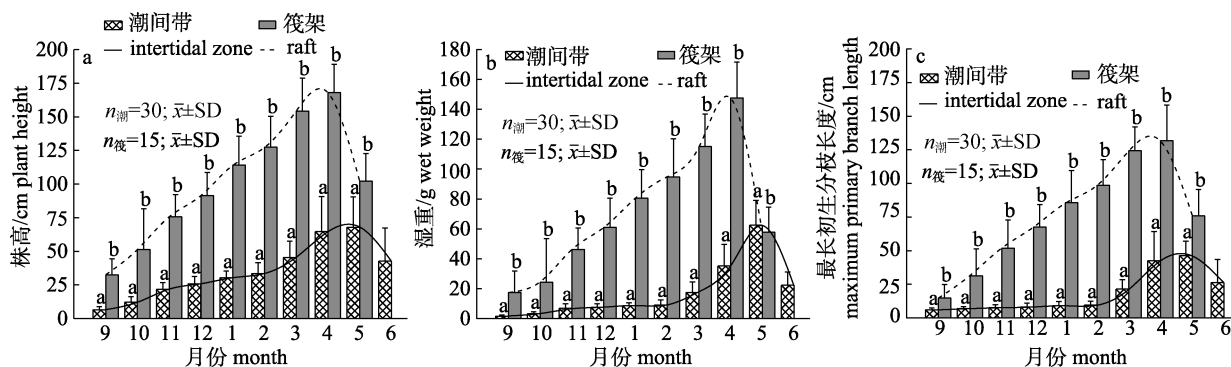


图 4 潮间带和筏架铜藻生物学参数逐月变化

a. 潮间带和筏架铜藻株高变化; b. 潮间带和筏架铜藻湿重变化; c. 潮间带和筏架铜藻最长初生分枝长度变化。

同一月份不同生境上标有不同字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 4 Monthly variation of biological parameters of intertidal zone and raft *Sargassum horneri*

a. Changes in plant height of intertidal zone and raft *Sargassum horneri*; b. Changes in wet weight of intertidal zone and raft *Sargassum horneri*; c. Changes in maximum primary branch length of intertidal zone and raft *Sargassum horneri*. Different letters are marked on different habitats in the same month indicating significant differences between groups ($P<0.05$).



图 5 潮间带和筏架铜藻

a. 6 月末开始衰败的潮间带铜藻; b. 6 月末已经死亡的潮间带铜藻; c. 5 月末衰败严重的筏架铜藻; d. 6 月已经死亡的筏架铜藻.

Fig. 5 Intertidal zone and raft *Sargassum horneri*

a. Intertidal zone *Sargassum horneri* that has just began to decay at the end of June; b. Dead intertidal zone *Sargassum horneri* at the end of June; c. Raft *Sargassum horneri* with severe decay at the end of May; d. Raft *Sargassum horneri* that has died in June.

表 1 潮间带铜藻生物学参数统计

Tab. 1 Statistical table on biological parameters of intertidal zone *Sargassum horneri*

n=30; $\bar{x} \pm SD$					
月份 month	株高/cm plant height	湿重/g wet weight	最长初生分枝长度/cm longest primary branch length	累计有效积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$) cumulative effective accumulated temperature	光强/[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] irradiance
9	6.5 $\pm$ 2.4	1.6 $\pm$ 0.7	6.0 $\pm$ 1.5	560.4	50.7
10	12.2 $\pm$ 4.1	3.3 $\pm$ 1.3	6.9 $\pm$ 1.5	1046.8	26.2
11	21.7 $\pm$ 5.0	6.8 $\pm$ 3.1	7.7 $\pm$ 2.2	1444.6	16.2
12	25.9 $\pm$ 5.5	7.5 $\pm$ 2.3	8.2 $\pm$ 2.9	1679.3	15.2
1	30.3 $\pm$ 5.0	8.6 $\pm$ 1.9	9.1 $\pm$ 3.2	1797.4	13.9
2	33.4 $\pm$ 8.2	9.1 $\pm$ 3.4	9.5 $\pm$ 3.0	1851.4	9.7
3	45.3 $\pm$ 12.3	17.4 $\pm$ 7.1	21.4 $\pm$ 6.9	2035.5	56.9
4	54.7 $\pm$ 25.9	35.2 $\pm$ 14.5	42.6 $\pm$ 21.5	2295.6	64.1
5	67.9 $\pm$ 22.5	62.4 $\pm$ 16.7	46.4 $\pm$ 10.6	2653.7	40.5
6	42.7 $\pm$ 24.7	22.3 $\pm$ 8.8	26.3 $\pm$ 17.2	3096.8	46.7

带铜藻株高、湿重和最长初生分枝长度分别由 9 月初始的(6.5 $\pm$ 2.4) cm、(1.6 $\pm$ 0.7) g 和(6.0 $\pm$ 1.5) cm 增长至 2023 年 5 月时的最大值(67.9 $\pm$ 22.5) cm、(62.4 $\pm$ 16.7) g 和(46.4 $\pm$ 10.6) cm, 6 月下降到(42.7 $\pm$ 24.7) cm、(22.3 $\pm$ 8.8) g 和(26.3 $\pm$ 17.2) cm; 而筏架铜藻株高、湿重和最长初生分枝长度分别由 9 月的(32.5 $\pm$ 11.9) cm、(17.4 $\pm$ 14.4) g 和(14.8 $\pm$ 10.1) cm 增长至 2023 年 4 月时的最大值(168.1 $\pm$ 21.0) cm、(147.6 $\pm$ 24.1) g 和(131.8 $\pm$ 26.4) cm, 到 5 月末仅为(102.3 $\pm$ 20.3) cm、(57.7 $\pm$ 16.9) g 和(75.9 $\pm$ 19.6) cm。筏架铜藻株高、湿重和最长初生分枝长度最大值远大于潮间带铜藻。

表 2 筏架铜藻生物学参数统计

Tab. 2 Statistical table on biological parameters of raft *Sargassum horneri*

n=30; $\bar{x} \pm SD$

月份 month	株高/cm plant height	湿重/g wet weight	最长初生分枝长度/cm longest primary branch length	累计有效积温/(℃·d) cumulative effective accumulated temperature	光强/[μmol/(m ² ·s)] irradiance
9	32.5±11.9	17.4±14.4	14.8±10.1	556.8	53.6
10	51.4±30.2	24.3±29.1	31.2±20.1	1036.4	27.5
11	75.6±16.5	46.2±14.3	51.8±21.0	1425.2	17.6
12	91.4±17.3	61.1±19.5	67.5±16.7	1665.8	7.4
1	114.2±21.3	80.5±19.1	85.7±23.8	1784.8	12.5
2	127.4±23.1	94.7±25.7	98.7±18.9	1842.2	6.8
3	154.2±24.6	115.1±21.8	124.3±17.6	2025.7	54.2
4	168.1±21.0	147.6±24.1	131.8±26.4	2284.9	73.0
5	102.3±20.3	57.7±16.9	75.9±19.6	2641.4	46.4
6	—	—	—	—	55.5

注: 表中“—”表示未采集到样品。
Note: — indicates no sample.

由表 1、2 和图 4 可知, 潮间带铜藻株高增长速率(V): $V_{2-4\text{月}} > V_{9-2\text{月}}$, 湿重和最长初生分枝长度增长速率(V): $V_{2-5\text{月}} > V_{9-2\text{月}}$; 筏架铜藻株高和最长初生分枝长度增长速率(V): $V_{2-3\text{月}} > V_{9-2\text{月}}$, 湿重增长速率(V): $V_{3-4\text{月}} > V_{9-3\text{月}}$; 潮间带和筏架铜藻生物学参数变化趋势相似。进入繁殖期前, 同一月份筏架铜藻湿重、株高和最长初生分枝长度增长速率远大于潮间带铜藻, 筏架铜藻生长迅速, 潮间带铜藻生长则较为缓慢。

2.3 潮间带和筏架铜藻生长所需有效积温的差异

综合图 4 和表 1、2 可知, 筏架铜藻达到生长繁殖期“顶点”比潮间带铜藻早 1~2 个月。潮间带和筏架铜藻分别在 5 月和 4 月达到生长繁殖期“顶点”, 此时株高、湿重和最长初生分枝长度达到生命周期的最大值, 所需有效积温分别为 2653.7 ℃·d 和 2284.9 ℃·d。不仅如此, 筏架铜藻株高、湿重和最长初生分枝长度达到最大增长速率也早于潮间带铜藻 1~2 个月。潮间带铜藻株高和最长初生分枝长度在 4 月达到最大增长速率, 所需有效积温为 2295.6 ℃·d, 湿重在 5 月达到最大增长速率, 所需有效积温为 2653.7 ℃·d; 而筏架铜藻株高和最长初生分枝长度在 3 月达到最大增长速率, 所需有效积温为 2025.7 ℃·d, 湿重在 4 月达到最大增长速率, 所需有效积温为 2284.9 ℃·d。当筏架铜藻达到生长繁殖期“顶点”, 株高、湿重和最长

初生分枝长度达到最大增长速率时, 所需的有效积温远小于潮间带铜藻。

2.4 温度和光强对铜藻生长的影响

由图 3、4 和表 1、2 可知, 2 月潮间带和筏架铜藻处于低温时期, 温度 9 ℃左右, 潮间带铜藻株高、湿重和最长初生分枝长度分别增加了 3.1 cm、0.5 g 和 0.5 cm, 而筏架铜藻湿重、株高和最长初生分枝长度分别增加了 13.2 cm、14.1 g 和 12.9 cm。9 ℃左右的低温时筏架铜藻生长速率远大于潮间带铜藻。潮间带铜藻 12 月与 4 月温度相近, 平均 15 ℃左右, 4 月光强比 12 月高 48.9 μmol/(m²·s); 12 月株高、湿重和最长初生分枝长度分别增加了 4.1 cm、0.7 g 和 0.5 cm, 而 4 月株高、湿重和最长初生分枝长度分别增加了 19.3 cm、17.8 g 和 21.2 cm。相似温度下, 光强高的 4 月潮间带铜藻生长速率更高。筏架铜藻也表现出相似的趋势, 筏架铜藻 12 月与 3 月时温度相近 13~14 ℃, 3 月光强比 12 月大 46.8 μmol/(m²·s); 12 月株高、湿重和最长初生分枝长度分别增加了 15.8 cm、14.9 g 和 15.7 cm, 而 3 月株高、湿重和最长初生分枝长度分别增加了 26.8 cm、20.5 g 和 25.6 cm, 3 月增长速率大于 12 月。相似温度下, 光强大的月份潮间带和筏架铜藻生长速率更高。

不仅如此, 进入繁殖期前, 同一月份筏架铜藻湿重、株高和最长初生分枝长度增长速率均远

大于潮间带铜藻；筏架铜藻株高、湿重和最长初生分枝长度最大值也远大于潮间带铜藻(图 4)。而潮间带和筏架铜藻生命周期中平均温度和光强相近,最大温度差在 11 月仅 0.3 °C,潮间带和筏架铜藻平均月光强分别为 34.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 35.4 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。潮间带和筏架的温度和光强均差异不大,但筏架铜藻生长速率却远大于潮间带铜藻。

3 讨论

3.1 不同生境铜藻有效积温差异

Li 等^[21]发现海平面 0 m 到海平面以下 3 m 以内,随着深度的增加,光强急剧下降,海水温度没有明显差异。在本研究中,枸杞岛潮间带和筏架的温度差异不大,符合 Li 等^[21]的结果。上述研究表明潮间带和潮下带的温度相似,潮间带的光强远大于潮下带。李训猛等^[3]研究的潮下带铜藻和本研究的潮间带铜藻初始株高相近,但潮下带铜藻达到生长繁殖期“顶点”所需的有效积温却远高于潮间带铜藻,可能是潮间带更高的光强造成的。

筏架铜藻也表现出相似的趋势,筏架铜藻达到生长繁殖期“顶点”所需的有效积温远小于潮间带铜藻。而潮间带和筏架的温度和光强差异不大,出现这种情况可能是因为筏架铜藻光合放氧效率大于潮间带铜藻。有研究表明晴天时铜藻的光合放氧效率在早上高于下午^[22]。潮间带光强因水深变化而不够稳定,光强因退潮露出水面而急剧增大的时间大多在下午,早上光强较小;而筏架早上光强大于潮间带,且较为稳定,因此筏架铜藻光合放氧效率高于潮间带铜藻。筏架平均 35 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 左右稳定的光强可能导致了筏架铜藻生长所需有效积温远小于潮间带铜藻。

3.2 光强对铜藻生长的重要性

相似温度下,光强大的月份潮间带和筏架铜藻生长速率更高。不仅如此,在潮间带和筏架铜藻生命周期中,潮间带和筏架的平均温度和光强相近,但筏架铜藻生长速率却远大于潮间带铜藻,筏架铜藻繁殖时间也比潮间带铜藻早 1~2 个月,可能是由于筏架 35 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 左右稳定的光强更有利于铜藻快速生长。孙建璋等^[6]研究表明在

筏式人工栽培铜藻试验中,9.8 °C 的低温时铜藻能达到最高生长率。在本研究中,2 月筏架和潮间带温度 9 °C 左右,但筏架和潮间带铜藻生长速率却大不相同,筏架铜藻生长迅速,潮间带铜藻却生长发育缓慢。筏架铜藻和孙建璋等^[6]研究的筏式人工栽培铜藻生长速率较高,可能是由于它们均具有良好的光强条件,而潮间带铜藻生长发育缓慢,可能是潮间带较差的光强条件造成的。由此推测,9 °C 左右的低温条件不是抑制铜藻生长的限制参数,而 35 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 左右稳定的光强可能是造成筏架铜藻生长速率远大于潮间带铜藻,以及筏架铜藻繁殖时间比潮间带铜藻早 1~2 个月的关键因素。

3.3 潮下带和潮间带铜藻生长差异

毕远新等^[23]通过调查发现了枸杞岛不同深度的底栖铜藻株高有着明显变化差异。与李训猛等^[3]探究的潮下带铜藻相比,本研究的潮间带铜藻株高最大值更小,衰败速度更快,两者呈不同的变化趋势,符合毕远新等^[23]的结果。而潮间带与潮下带铜藻温度相近,潮间带铜藻光强远大于潮下带^[21]。良好的光强条件并没有促进潮间带铜藻株高的快速生长,可能是因为波浪运动是藻类群落结构和生长的重要控制因素^[24]。生长在潮间带的铜藻往往会受到波浪等外在因素的较大影响,将自身一部分能量用来抓牢岩礁以抵抗波浪等因素的干扰。潮下带铜藻生长环境则较稳定,受波浪等外在因素干扰较小,可以将绝大部分能量用于生长繁殖。波浪等外在因素对潮间带铜藻生长的干扰远大于潮下带铜藻,造成了温度相近、光强更大的潮间带铜藻株高最大值小于潮下带铜藻,衰败快于潮下带铜藻。

3.4 枸杞岛附近海域漂浮铜藻来源分析

定生铜藻在物理、生物等条件下,藻体断裂或固着器脱离附着基质,漂浮于海面形成了漂浮铜藻^[9]。枸杞岛的贻贝养殖面积达到 11.2 km^2 ,在贻贝养殖筏架上定生生长着大量的铜藻,据推算 9 月幼苗期生物量约为 3800 万株。而孙建璋等^[19]发现底栖铜藻分布面积和数量逐年减少。枸杞岛岛礁周边底栖铜藻分布较少,不足以形成大规模的漂浮铜藻群。从枸杞岛附近海域漂浮铜藻群约

112 km² 的巨大规模来看^[18], 极大部分漂浮铜藻可能来源于枸杞岛筏架定生铜藻。Li 等^[21]和刘正一等^[25]通过调查发现枸杞岛漂浮铜藻生长速度远比底栖铜藻快。而本研究发现进入繁殖期前, 同一月份筏架铜藻湿重、株高和最长初生分枝长度增长速率均远大于潮间带铜藻。研究表明漂浮和筏架铜藻生长速率均远大于底栖铜藻。从枸杞岛漂浮铜藻较快的生长速度来看^[21,25], 极大部分漂浮铜藻可能来源于筏架定生铜藻。由此推测枸杞岛附近海域的极大部分漂浮铜藻可能来源于枸杞岛的筏架定生铜藻。此外, 除了枸杞岛附近海域, 其它海域的极大部分漂浮铜藻是否来源于筏架定生铜藻仍然有待于进一步探究。

4 结论

本研究解析了潮间带和筏架定生铜藻生长差异及成因。进入繁殖期前, 同一月份筏架铜藻湿重、株高和最长初生分枝长度增长速率远大于潮间带铜藻, 筏架铜藻生长迅速, 潮间带铜藻生长则较为缓慢。9℃左右的低温条件不是抑制铜藻生长的限制参数, 而 35 μmol/m²·s 左右稳定的光强可能是造成潮间带和筏架铜藻生长差异的关键因素。枸杞岛附近海域的极大部分漂浮铜藻可能来源于枸杞岛的筏架定生铜藻。

参考文献:

- [1] Zeng C K, Lu B R. Chinese seaweed flora: Volume III, book II [M]. Beijing: Science Press, 2000: 43-44. [曾奎奎, 陆保仁. 中国海藻志: 第三卷, 第二册[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 43-44.]
- [2] Li D P, Li H, Zhang G J, et al. Studies on the reproduction and development of *Sargassum horneri*[J]. Marine Sciences, 2018, 42(5): 40-45. [李大鹏, 李慧, 张桂军, 等. 铜藻繁殖发育过程的研究[J]. 海洋科学, 2018, 42(5): 40-45.]
- [3] Li X M, Zhang S Y, Wang K, et al. Effect of annual temperature variation on growth of *sargassum horneri* in Gouqi Island[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(5): 1136-1143. [李训猛, 章守宇, 王凯, 等. 周年温度变化对枸杞岛铜藻生长特性的影响[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(5): 1136-1143.]
- [4] Zhao S J. Marine algae ecology[M]. Beijing: Ocean Press, 2014: 164. [赵淑江. 海洋藻类生态学[M]. 北京: 海洋出版社, 2014: 164.]
- [5] Wang L M, Wang S Y, Xu W D, et al. Effects of temperature, light intensity and ratio of nitrogen to phosphorus on growth of seedlings in sea weed *Sargassum horneri*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(3): 376-381. [王丽梅, 王舒扬, 许伟定, 等. 温度、光强及氮磷比对断枝铜藻幼苗生长的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 376-381.]
- [6] Sun J Z, Zhuang D G, Sun Q H, et al. Artificial cultivation trials of *Sargassum horneri* at Nanji Islands of China[J]. South China Fisheries Science, 2009, 5(6): 41-46. [孙建璋, 庄定根, 孙庆海, 等. 铜藻人工栽培的初步研究[J]. 南方水产, 2009, 5(6): 41-46.]
- [7] Luan Q, Lyu F, Wu H Y, et al. Effects of culture conditions on nutrient composition of *Sargassum horneri*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(4): 123-130. [栾青, 吕芳, 吴海一, 等. 不同培养条件对铜藻生长和营养组分的影响[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(4): 123-130.]
- [8] Bi Y X, Zhang S Y, Wang W D, et al. Vertical distribution pattern of *Sargassum horneri* and its relationship with environmental factors around Gouqi Island[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 4931-4937. [毕远新, 章守宇, 王伟定, 等. 枸杞岛铜藻垂直分布格局及成因分析[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4931-4937.]
- [9] Hinojosa I A, Pizarro M, Ramos M, et al. Spatial and temporal distribution of floating kelp in the channels and fjords of southern Chile[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 87(3): 367-377.
- [10] Komatsu T. Temporal fluctuations of water temperature in a *Sargassum* forest[J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 1985, 41(4): 235-243.
- [11] Miller K A, Engle J M, Uwai S, et al. First report of the Asian seaweed *Sargassum filicinum* Harvey (Fucales) in California, USA[J]. Biological Invasions, 2007, 9(5): 609-613.
- [12] Almeida O U H, Beltrones D A S. Substrate-dependent differences between the structures of epiphytic and epilithic diatom assemblages off the southwestern coast of the Gulf of California[J]. Botanica Marina, 2012, 55(2): 149-159.
- [13] Hwang E K, Lee S J, Ha D S, et al. *Sargassum* golden tides in the Shinan-Gun and Jeju Island, Korea[J]. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2016, 49(5): 689-693.
- [14] Liu F, Liu X F, Wang Y, et al. Insights on the *Sargassum horneri* golden tides in the Yellow Sea inferred from morphological and molecular data[J]. Limnology and Oceanography, 2018, 63(4): 1762-1773.
- [15] Kokubu Y, Rothäusler E, Filippi J B, et al. Revealing the deposition of macrophytes transported offshore: Evidence of their long-distance dispersal and seasonal aggregation to the

- deep sea[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 4331.
- [16] Lin S M, Huang R, Ogawa H, et al. Assessment of germling ability of the introduced marine brown alga, *Sargassum horneri*, in northern Taiwan[J]. Journal of Applied Phycology, 2017, 29(5): 2641-2649.
- [17] Kim H S, Asanka Sanjeeva K K, Shanura Fernando I P, et al. A comparative study of *Sargassum horneri* Korea and China strains collected along the coast of Jeju Island South Korea: Its components and bioactive properties[J]. Algae, 2018, 33(4): 341-349.
- [18] Ding X W, Zhang J H, Zhuang M M, et al. Growth of *Sargassum horneri* distribution properties of golden tides in the Yangtze Estuary and adjacent waters[J]. Marine Fisheries, 2019, 41(2): 188-196. [丁晓玮, 张建恒, 庄旻敏, 等. 我国长江口及邻近海域铜藻生长和金潮分布变化特征[J]. 海洋渔业, 2019, 41(2): 188-196.]
- [19] Sun J Z, Chen W D, Zhuang D G, et al. In situ ecological studies of the subtidal brown alga *Sargassum horneri* at Nanji Island of China[J]. South China Fisheries Science, 2008, 4(3): 58-63. [孙建璋, 陈万东, 庄定根, 等. 中国南麂列岛铜藻 *Sargassum horneri* 实地生态学的初步研究[J]. 南方水产, 2008, 4(3): 58-63.]
- [20] Niu C J, Lou A R, Sun R Y, et al. Fundamentals of ecology (2nd ed)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 6-33. [牛翠娟, 娄安如, 孙儒泳, 等. 基础生态学(第 2 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 6-33.]
- [21] Li J J, Pang Y L, Qin S, et al. Comparison of the photo-acclimation potential of floating and benthic thalli of *Sargassum horneri* (Phaeophyta) during autumn and winter[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2022, 40(1): 195-205.
- [22] Ramus J, Rosenberg G. Diurnal photosynthetic performance of seaweeds measured under natural conditions[J]. Marine Biology, 1980, 56(1): 21-28.
- [23] Bi Y X, Zhang S Y, Wu Z L. Seasonal variations of *Sargassum horneri* distribution around Gouqi Island of East China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1255-1259. [毕远新, 章守宇, 吴祖立. 枸杞岛铜藻种群分布的季节变化[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1255-1259.]
- [24] Choi S K, Oh H J, Yun S H, et al. Population dynamics of the 'golden tides' seaweed, *Sargassum horneri*, on the southwestern coast of Korea: The extent and formation of golden tides[J]. Sustainability, 2020, 12(7): 2903.
- [25] Liu Z Y, Sun P, Qin S, et al. Comparative analysis of growth and photosynthetic characteristics in benthic and floating *Sargassum horneri*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(1): 76-83. [刘正一, 孙平, 秦松, 等. 底栖铜藻和漂浮铜藻生长与光合生理的比较[J]. 生态学杂志, 2021, 40(1): 76-83.]

Comparative growth analysis of intertidal zone and raft *Sargassum horneri* in Gouqi Island

WANG Huijie¹, YANG Qifan¹, ZHU Weidong¹, MIAO Hang¹, BI Yuanxin^{1, 2, 3}

1. Marine and Fishery Institute of Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China;

2. Key Laboratory of Mariculture and Enhancement of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China;

3. Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for Fishery Resource of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China

Abstract: The sea area near Gouqi Island harbors expansive floating colonies of *Sargassum horneri*, whose specific source remains unidentified. Despite this, the distribution of *S. horneri* in the intertidal zone is limited. Hence, analyzing the growth changes of both intertidal zone and raft *S. horneri* is essential for understanding the origins of “gold tide.” Previous studies have demonstrated a correlation between the growth of intertidal zone and *S. horneri* and the changes in effective accumulated temperature. Furthermore, it is suggested that temperature and irradiance may have varying effects on the growth of intertidal zone and raft *S. horneri*. In this study, we aimed to explore the specific sources of floating *S. horneri* in the sea area near Gouqi Island. We also aimed at elucidating the growth patterns of both intertidal zone and raft *S. horneri* and identifying the required effective accumulated temperature. Additionally, we aimed to discern the distinct impacts exerted by temperature and irradiance on these growth patterns. Intertidal zone and raft *S. horneri* were collected monthly between September 2022 and June 2023. The temperature and irradiance changes during the life cycle in this period were recorded, and the variations in different plant traits, such as plant height, wet weight, longest primary branch length, were analyzed. Lastly, the effects of temperature and irradiance on the growth of *S. horneri* were also investigated. The results are summarized below: Average plant height, wet weight, and longest primary branch length of raft *S. horneri* were (168.1±21.0) cm, (147.6±24.1) g, and (131.8±26.4) cm, respectively, which were much larger than those of intertidal zone *S. horneri* [(67.9±22.5) cm, (62.4±16.7) g, and (46.4±10.6) cm]. Before the breeding period, the growth rates of wet weight, plant height, and longest primary branch length of raft *S. horneri* were much higher than those of intertidal zone *S. horneri*. Raft *S. horneri* grew rapidly compared to intertidal zone *S. horneri*. The low temperature condition of about 9 °C limited the growth of *S. horneri*, and the stable irradiance around 35 μmol/(m²·s) may be the key factor that leads to the effective accumulated temperature required for the growth of raft *S. horneri*. This value was much smaller than that of intertidal *S. horneri*. Additionally, the breeding time of raft *S. horneri* was 1–2 months earlier than that of intertidal zone *S. horneri*, and the growth rate of the former was much greater than that of intertidal zone *S. horneri*. Raft *S. horneri* may contribute significantly to the floating *S. horneri* population in the sea area near Gouqi Island. Our results illustrate that the growth rate of plant height, wet weight and longest primary branch length of the raft *S. horneri* was much faster than that of the intertidal zone *S. horneri*, and it suggest that irradiance is the key environmental factor affecting the growth and reproduction of intertidal zone and raft *S. horneri*. These results provide a scientific evidence for identifying the source of floating *S. horneri*, which may assist its efficient cultivation in the sea area near Gouqi Island. In addition, the study confirmed the interference of external factors; for example, the impact of waves on the growth of intertidal zone *S. horneri* was much greater than that on the growth of subtidal zone *S. horneri*. Hence, the maximum plant height of intertidal zone *S. horneri* at similar temperatures and greater irradiance was smaller than that of subtidal zone *S. horneri*, and the decay was faster than subtidal zone *S. horneri*.

Key words: *Sargassum horneri*; intertidal zone; raft; selected traits; temperature; effective accumulated temperature; irradiance

Corresponding author: BI Yuanxin. E-mail: byx369@163.com