



## 枸杞岛铜藻气囊形态特征及其与环境因子的关系

吴祖立<sup>1,2,3</sup>, 陈亮然<sup>4</sup>, 王凯<sup>2</sup>, 章守宇<sup>2\*</sup>, 毕远新<sup>1\*</sup>

(1. 浙江省海洋水产研究所, 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室,  
农业农村部重点渔场渔业资源科学观测实验站, 浙江 舟山 316021;

2. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

3. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;

4. 北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083)

**摘要:** 为更好地分析东海海域漂流铜藻是源于舟山海域底栖铜藻的可能性, 并为此提供实地生态学参考依据, 本研究以枸杞岛海域底栖铜藻为对象, 研究底栖铜藻植株和气囊的形态特征变化及其对海洋环境因子变化的响应, 探讨底栖铜藻气囊发育成熟的窗口期。结果显示, 9月铜藻植株顶部的主侧枝开始出现气囊, 翌年3—5月铜藻藻体生长速率最大, 3—4月主侧枝的气囊数量快速增长, 4月每根主侧枝平均气囊数量达最大, 气囊发育成熟。各月气囊的数量、平均长度和平均湿重的分布为顶部主侧枝>中部主侧枝>底部主侧枝, 平均直径较均匀, 底部主侧枝气囊平均体积显著小于顶部和中部的。铜藻完成生活史所需的净效积温为4 434.75 °C·d, 9月气囊开始出现时所需的净效积温为1 853.47 °C·d, 4月气囊生长发育达到峰值所需的净效积温为3 611.25 °C·d。研究海域的海温变化主要受季风活动引起的海流变化影响, 海水低温期后的升温条件可能是诱发铜藻快速生长的因素, 较高的海温可限制铜藻的生长。

**关键词:** 铜藻; 净效积温; 漂流藻; 金潮; 海洋牧场; 海藻场; 枸杞岛

**中图分类号:** S 917.3

**文献标志码:** A

气囊是马尾藻科(Sargassaceae)种类常见的囊状结构, 由皮层细胞加厚和中央髓部细胞逐渐分离形成, 生于藻体枝端或叶腋间, 内贮气体, 可增加藻体的漂浮能力<sup>[1]</sup>。马尾藻假根脱离附着基或藻体受外力断裂后, 游离藻体可依靠其气囊漂浮于海面, 并以漂浮状态完成其部分生活史<sup>[2]</sup>。在海流和风场的作用下, 数量众多的漂浮海藻集聚成为漂流藻团, 并可进行远距离飘移<sup>[3-5]</sup>, 具有良好的生物多样性支持功能<sup>[6-8]</sup>。

铜藻(*Sargassum horneri*)隶属于马尾藻科马尾藻属(*Sargassum*), 营固着生长, 藻体纤弱, 株高可达8 m, 具有圆柱状气囊, 分布于侧枝上,

是西北太平洋特有的暖温带性种类<sup>[9]</sup>。近年来, 北太平洋沿岸海域发生了多次大规模的漂流铜藻聚集形成“金潮”侵入事件, 远至美国加利福尼亚、墨西哥湾等海域均有漂流铜藻分布的报道<sup>[10-11]</sup>, 但漂流铜藻的发生主要在中国、韩国、日本等国沿岸海域<sup>[12-17]</sup>。有报道称, 2017年侵入韩国济州岛造成一定程度生态灾害的铜藻漂流藻是源于中国舟山海域<sup>[13,16]</sup>, 该论断引发了有关漂流铜藻源头<sup>[3,12,16]</sup>、分子生物学特征<sup>[14,18]</sup>、底栖铜藻与漂流铜藻生理结构比较<sup>[13,19]</sup>等的研究探讨, 但有关支撑铜藻漂浮的气囊结构形态特征变化及其与环境因子关系的研究却少有

收稿日期: 2019-05-10 修回日期: 2019-07-29

资助项目: 国家自然科学基金(41876191); 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室开放课题(2016RF005); 现代农业产业技术体系专项(CARS-50); 浙江省科技厅项目(LGN18C030003, 577767901)

通信作者: 章守宇, E-mail: syzhang@shou.edu.cn; 毕远新, E-mail: byx369@163.com

报道。

枸杞岛位于浙江舟山东北部海域,该岛临近海域以岩礁底质为主,为海藻固着生长的附着基,潮下带具有一定规模的铜藻海藻场<sup>[20-21]</sup>。本研究对枸杞岛海藻场中底栖铜藻整个生命周期中的铜藻植株和气囊的形态特征变化及其对环境因子变化的响应进行研究,旨在通过掌握研究海域底栖铜藻气囊生长发育规律和海流、海温等环境因子变化的关系,探讨底栖铜藻气囊发育成熟的窗口期,为更好地分析验证济州岛漂流铜藻来源于舟山海域底栖铜藻的可能性提供实地研究参考资料。

## 1 材料与方 法

### 1.1 调查站点选择

根据课题组于2011年6月运用BioSonics DT-X回声探测仪与现场潜水样方同步采样探测调查枸杞岛及周边岛礁沿岸海藻场内大型底栖海藻覆盖度的结果<sup>[20-21]</sup>,铜藻主要分布在枸杞岛西北侧和东南侧的岩礁区域,且呈现斑块状不连续的分布状态。综合考虑枸杞岛铜藻的分布特点和长期潜水调查采样的安全性和可行性,本研究选取枸杞岛东南侧小石浦(XSP)站点(30.71°N, 122.78°E)的底栖铜藻为对象,对其生活中气囊的形态特征进行调查研究(图1)。

### 1.2 样品的采集与处理

**生物样品采集** 本研究于2013年7月—2014年6月,逐月在XSP站点进行潜水随机采集底栖铜藻样本30株,样本均保存于含7%甲醛的海水中,带回实验室进行生物学检测,测定指标:①株高( $H$ ),植株固着器底端至枝叶顶端的最大距离(cm);②植株湿重( $W_s$ , g);③气囊数量( $N$ ),主侧枝上气囊的数量(个);④气囊长度( $L$ ),随机选取主侧枝上气囊的长度(mm);⑤气囊直径( $d$ ),随机选取主侧枝上气囊的直径(mm);⑥气囊的湿重( $V_s$ , g)。株高采用皮尺进行测量;气囊长度和直径采用游标卡尺(三菱,香港)进行测量;植株湿重和气囊湿重采用分析天平(赛多利斯,北京)进行测量。对铜藻主侧枝的界定参考陈亮然等<sup>[22]</sup>对铜藻形态的描述,其中本研究将铜藻植株按株高平均分为3部分,从固着器底端向上分别为铜藻的底部、中部和顶部。

由于研究海域在2月时水温低、海况复杂,不利于潜水采样,所以翌年2月的铜藻样本未能采集,本研究未能展现2月期间枸杞岛铜藻的生物学状况。5月底6月初铜藻完成孢子繁殖,幼孢子体着床至7月末研究海域无成形的铜藻藻体,所以本次调查无7月期间铜藻植株的生物学数据<sup>[22]</sup>。

**环境数据来源** 海上实测数据为国家海洋数据信息服务中心(<http://www.odinwestpac.org.cn>)发布的嵊山浮标观测站(30.80°N, 122.80°E)监测

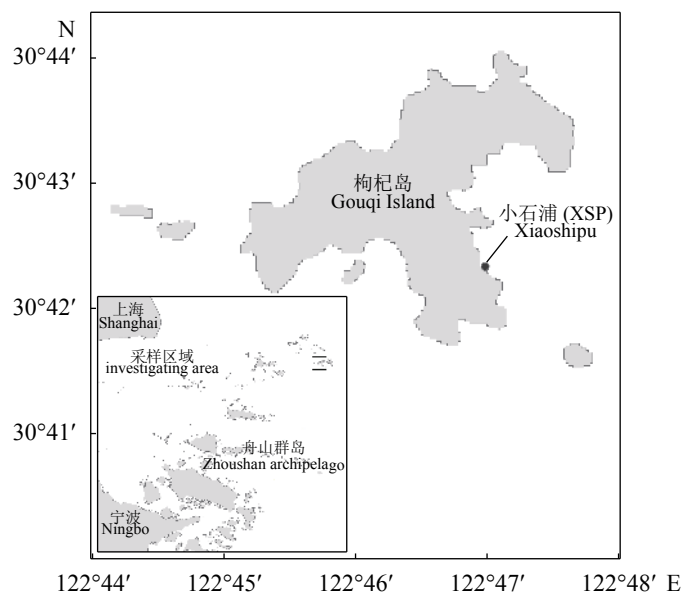


图1 调查区域和站点分布图

Fig. 1 Investigating area and study site distribution

数据,包括日期、风向(°)、风速(m/s)、海水温度(°C)。数据时间为2013年1月1日—2014年12月31日,数据记录时间尺度为1 h。

海表温度遥感数据来源于美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的4级海表温度数据([https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/JPL\\_OUROCEAN-L4UHFnd-GLOB-GISST](https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/JPL_OUROCEAN-L4UHFnd-GLOB-GISST)),水平分辨率为0.01(°),研究区域为(120°~124°E, 28°~33°N),包括经纬度、日期、海水温度(°C)。数据时间跨度为2013年6月1日—2014年9月30日,时间分辨率为1 d。

海流资料来自迈阿密大学数值模式团队(University of Miami modeling group)和美国海军研究实验室(Naval Research Lab)合作的HYCOM模式同化的表层海流和表层海温产品(<https://www.hycom.org>),资料水平分辨率为0.08(°),研究区域为(120°~124°E, 28°~33°N),数据时间跨度为2013年6月1日—2014年9月30日,时间分辨率为3 h。

### 1.3 数据分析

**生物学指标** 将铜藻生物学指标测量数据导入Microsoft Access 2010软件构建生物学数据库,查询铜藻月平均的株高、植株湿重,分组统计株高组的月出现频率;查询各部位主侧枝气囊月平均的数量、长度、直径、湿重,分组统计这些参数的月出现频率;根据气囊长度和直径参数,按照圆柱体体积方程计算气囊的体积。

生长速率是指单位时间内铜藻株高的增加量<sup>[22]</sup>,即:

$$V_t = (L_2 - L_1) / (T_2 - T_1)$$

式中,  $V_t$ 为铜藻的生产速率;  $T_1$ 和 $T_2$ 分别为某段需要计算生产速率的起始时间和截止时间(d);  $L_1$ 和 $L_2$ 分别为 $T_1$ 和 $T_2$ 时间点对应的铜藻株高(mm)。

净效积温(net effective accumulated temperature)是铜藻在某个生育期或全部生育期内净效温度的总和,净效温度是实际温度减去生物学零度和生物学上限外的温度<sup>[23]</sup>,即:

$$A_e = \sum_{i=1}^n [(T_i - B) - (T_i - B_h)]$$

( $T_i > B$ , 当 $T_i \leq B$ 或 $T_i \leq B_h$ 时,则 $T_i - B$ 和 $T_i - B_h$ 相应以0计)

式中,  $A_e$ 为净效积温(°C·d),  $n$ 为发育时期历经的天数(d),  $T_i$ 为第 $i$ 日平均海温(°C),  $B$ 为该发育阶

段的生物学零度(°C),  $B_h$ 为该发育阶段的生物学上限温度(°C)。

分析研究海域铜藻生命周期的净效积温,掌握铜藻气囊生长发育的积温状态,可根据研究海域海温的变化进一步预测铜藻气囊的生长成熟期。本研究中铜藻的生物学零度和生物学上限温度分别取值7.1和25.0 °C,铜藻生存温度上下限分别取值7.1和30.0 °C<sup>[24-25]</sup>。根据前述查询的日平均海温,分别计算研究海域2013年6月—2014年5月铜藻的净效温度和净效积温。

**环境因子处理** 将嵎山浮标观测站海温数据和NASA海表温度提取数据导入Access构建数据库,选取数据库中的时间、经纬度、海温数据。在Access中对嵎山浮标观测站海温数据进行查询设计,分别查询2013年6月—2014年9月和2000年1月—2018年10月的月平均海温和日平均海温。利用NASA海表温度数据提取计算XSP站点在2013年6月—2014年9月的月平均海温和日平均海温。

利用空间分析软件ArcGIS对HYCOM数据抽取2013年11—12月和2014年2—3月的海流和海温数据,根据空间位置进行海流和海温数据匹配并作图。

**检验分析** 使用SPSS 22.0软件完成One-Way ANOVA 检验和Bivariate相关性检验,分析各个处理之间差异和相关性的显著性,以 $P < 0.05$ 作为显著性水平。使用Microsoft Excel 2010软件处理图表中的数据, HYCOM海流和海温分布图通过ArcGIS软件完成。

## 2 结果

### 2.1 生物学特征变化

**铜藻株高与株重季节变动** 实验共计测量302株铜藻,株高为8.20~77.92 cm。铜藻在不同季节呈现不同程度的生长情况,株高的变化有明显的季节性,随时间呈现逐月增加的趋势(图2-a)。夏季(6—8月)生长相对缓慢,生长速率为1.52 mm/d;秋季(9—11月)生长迅速,生长速率为2.29 mm/d;冬季(12—2月)是生长最为缓慢的时期,生长速率为1.29 mm/d;春季(3—5月)是铜藻生长最快的时期,其生长速率可达3.80 mm/d。8—11月,铜藻株高分布峰值以10 cm为一组逐月递增;12月—翌年1月铜藻株高分布峰值维持在30~40 cm,按比例逐月增长;3月起铜藻株高峰



值逐步右倾, 4月铜藻株高峰值为40~60 cm; 5—6月峰值为70~80 cm, 且6月铜藻进入凋亡期, 停止生长(图3)。

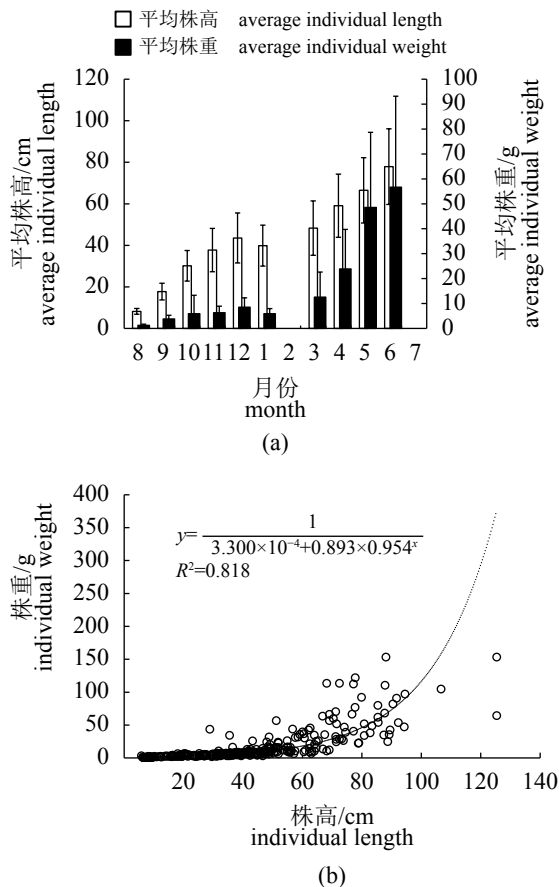


图2 2013年8月—2014年6月枸杞岛铜藻株高株重的季节变动(a)和生长曲线(b)

Fig. 2 Seasonal variation in average individual length and weight (a) and growth curve (b) of *S. horneri* in Gouqi Island from August 2013 to June 2014

铜藻株重的变化趋势与株高的一致, 具有明显的季节性。8月幼苗期铜藻个体平均株重最低, 仅为1.25 g; 6月成藻期个体平均株重达到最大值, 为56.67 g。8月—翌年3月, 铜藻株重增加缓慢, 3月后株重增长迅速。3—4月铜藻株重增幅最大, 每月平均株重增幅达0.97倍。月均单位长度株高的重量(即株高/株重)在8—11月约为0.19 g/cm, 12月—翌年1月约为0.17 g/cm, 之后3月起逐渐由0.26 g/cm增加至5月的0.73 g/cm, 6月维持在5月的水平。由于铜藻的最大记载株高与株重分别为7 m和3 kg<sup>[19]</sup>, 本研究以此记录作为铜藻的生长上限而拟合的logistic生长关系曲线结果见图2-b:

<http://www.sxuebao.cn>

$$y = \frac{1}{3.300 \times 10^{-4} + 0.893 \times 0.954^x} (R^2 = 0.818)$$

式中,  $y$ 为铜藻植株湿重(g),  $x$ 为铜藻植株高度(cm)。

**气囊生物学特征变化** 实验共统计测量铜藻主侧枝1 148个气囊, 其中顶部主侧枝565个, 中部主侧枝416个, 底部主侧枝167个, 各部位主侧枝的气囊数量月分布见图4。铜藻气囊在9月开始出现, 且是先在植株顶部的主侧枝上出现。随着时间的变化, 铜藻各部位主侧枝气囊的数量逐渐增加, 且各月气囊数量分布为顶部>中部>底部。主侧枝气囊的数目在3—4月呈快速增长, 4月每根主侧枝气囊数达到最大值, 平均每根主侧枝气囊为18.09个, 最多为59个; 5—6月铜藻气囊个数逐渐降低, 主侧枝气囊数量最多, 分别为40和33个。

实验共计测量1 148个气囊长度(图5-a), 其中顶部主侧枝565个, 中部主侧枝416个, 底部主侧枝167个。各部位主侧枝的气囊长度随时间变化存在显著差异( $F=1.831, P=0.034$ ), 气囊月平均长度为顶部主侧枝>中部主侧枝>底部主侧枝。经统计, 顶部主侧枝气囊长度为0.06~27.49 mm, 平均长度11.15 mm, 其中有432个气囊长度集中在8~16 mm, 约占总数的76.00%; 中部主侧枝气囊长度为0.52~18.81 mm, 平均长度10.42 mm, 其中有361个气囊长度集中在6~16 mm, 约占总数的87.00%; 底部主侧枝气囊长度为0.30~16.42 mm, 平均长度9.61 mm, 其中有136个气囊长度集中在6~14 mm, 约占总数的81.00%。

实验共计测量1 148个气囊直径(图5-b), 其中顶部主侧枝565个, 中部主侧枝416个, 底部主侧枝167个。各部位主侧枝的气囊直径随时间变化无显著差异( $F=0.997, P=0.318$ ), 各部位气囊月平均直径较一致。顶部主侧枝气囊直径为0.01~3.38 mm, 平均直径1.99 mm, 其中有477个气囊直径集中在1.25~2.75 mm, 约占总数的84.42%; 中部主侧枝气囊直径为0.18~3.95 mm, 平均直径2.03 mm, 其中有342个气囊直径集中在1.25~2.75 mm, 约占总数的82.21%; 底部主侧枝气囊直径为0.18~3.45 mm, 平均直径1.77 mm, 其中有133个气囊直径集中在1.25~2.25 mm, 约占总数的73.05%。

实验共计测量849个气囊湿重(图5-c), 其中顶部主侧枝269个, 中部主侧枝413个, 底部主侧

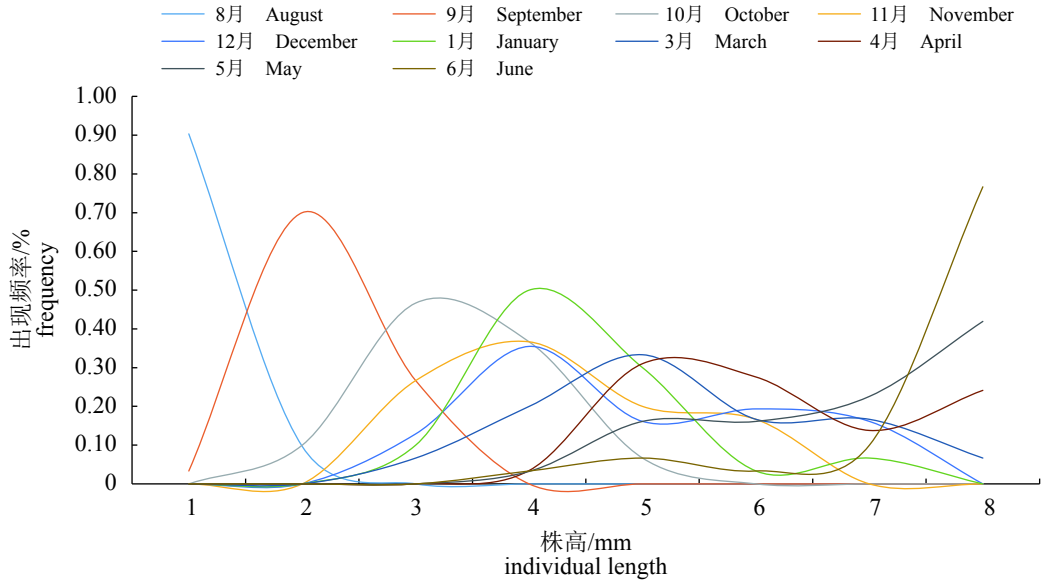


图 3 2013年8月—2014年6月枸杞岛铜藻株高月出现频率分布

Fig. 3 Monthly frequency of individual length of *S. horneri* in Gouqi Island from August 2013 to June 2014

1. ≤10; 2. >10, ≤20; 3. >20, ≤30; 4. >30, ≤40; 5. >40, ≤50; 6. >50, ≤60; 7. >60, ≤70; 8. >70, ≤80

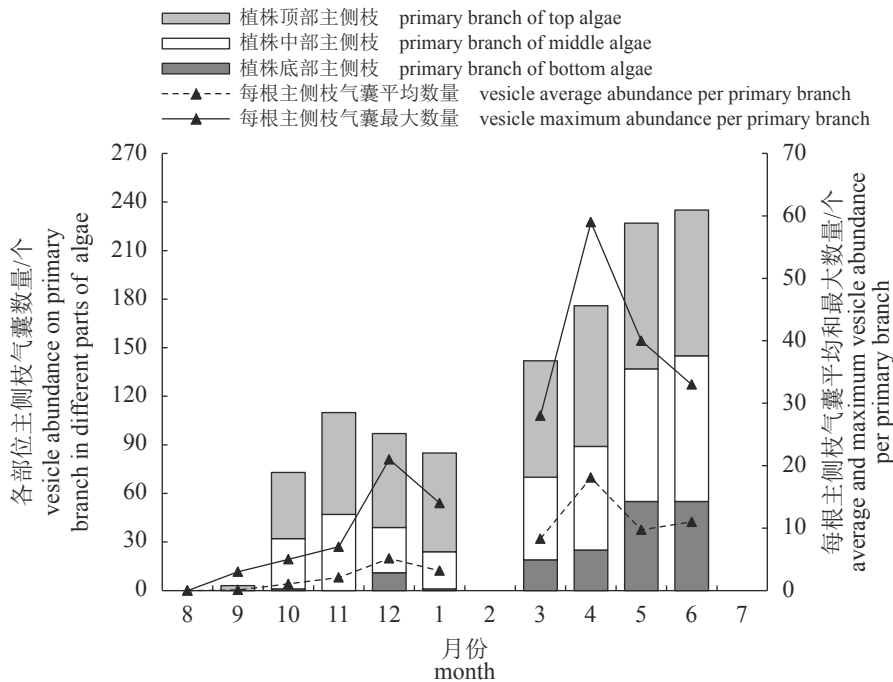


图 4 2013年8月—2014年6月枸杞岛铜藻各部位主侧枝气囊数量和每根主侧枝气囊的平均与最大数量月分布

Fig. 4 Monthly distribution of vesicles number on primary branch on different parts, average and maximum vesicles number per primary branch of *S. horneri* in Gouqi Island from August 2013 to June 2014

枝167个。各部位主侧枝的气囊湿重随时间变化存在显著差异( $F=1.753, P=0.046$ )。顶部主侧枝气囊湿重为0.002~0.320 g, 平均湿重0.031 g, 其中有179个气囊湿重集中分布在0.20~0.36 g, 约占总

数的66.54%; 中部主侧枝气囊湿重为0.001~0.310 g, 平均湿重0.031 g, 其中有407个气囊湿重集中分布在0~0.08 g, 约占总数的98.55%; 底部主侧枝气囊湿重为0.001~0.108 g, 平均湿重0.020 g,

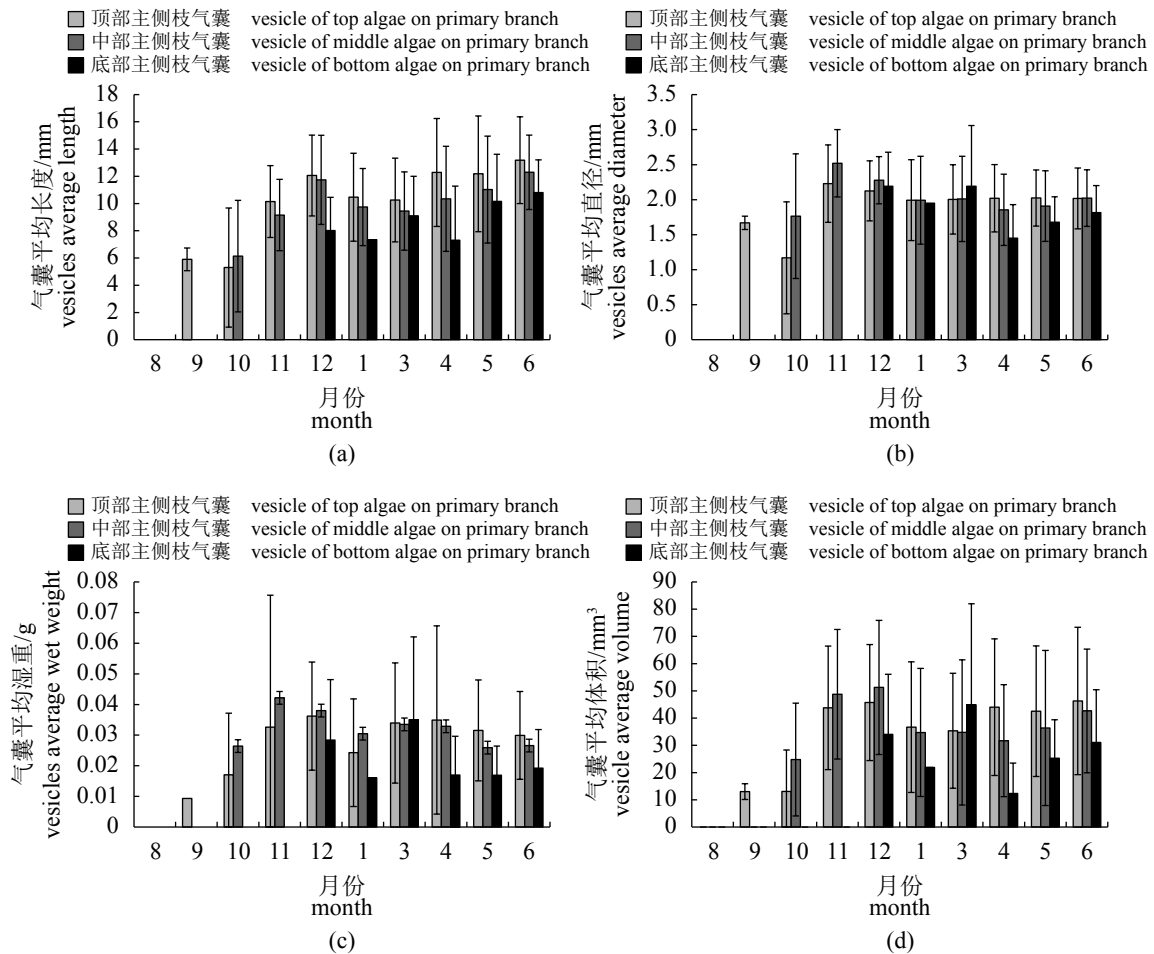


图5 枸杞岛铜藻各部位主侧枝气囊月平均长度(a)、平均直径(b)、平均湿重(c)和平均体积(d)

Fig. 5 Monthly average length (a), average diameter (b), average weight (c) and average volume (d) of vesicles on primary branch on different parts of *S. horneri* in Gouqi Island

其中有154个气囊湿重集中分布在0~0.04 g, 约占总数的92.22%。

通过测量得到气囊的长度和直径, 可估算出铜藻各部位主侧枝气囊的体积(图5-d)。顶部主侧枝气囊平均体积为 $(39.98 \pm 1.04) \text{ mm}^3$ , 中部主侧枝气囊平均体积为 $(38.26 \pm 1.23) \text{ mm}^3$ , 底部主侧枝气囊平均体积为 $(27.88 \pm 1.67) \text{ mm}^3$ , 底部主侧枝气囊体积相对顶部和中部的偏小并且数量偏少。对各部位主侧枝的气囊体积进行LSD检验, 结果显示底部主侧枝气囊体积分别与顶部和中部主侧枝气囊体积存在极显著差异( $F=7.652, P=0.006$ 和 $F=8.040, P=0.005$ ), 顶部主侧枝气囊体积和中部主侧枝气囊体积无显著差异( $F=0.08, P=0.778$ )。由于各部位主侧枝气囊的直径差异不显著, 而气囊长度存在显著差异, 因此本研究以气囊长度和体积参数拟合各部位主侧枝气囊的长度和体积关系曲线:

$$y_{\text{顶}} = 0.4032 x_{\text{顶}}^{1.8341} (R^2 = 0.7308)$$

$$y_{\text{中}} = 0.8070 x_{\text{中}}^{1.5749} (R^2 = 0.6987)$$

$$y_{\text{底}} = 0.7448 x_{\text{底}}^{1.5101} (R^2 = 0.6846)$$

式中,  $y$ 为气囊体积( $\text{mm}^3$ );  $x$ 为气囊长度( $\text{mm}$ )。

## 2.2 环境因子变化

**海水温度** 由嵎山浮标观测站实测的日平均海水温度与提取自NASA海表温度遥感数据中嵎山经纬度的日平均海水温度拟合的月平均海温曲线见图6-a。分别对两组数据进行ANOVA检验和Bivariate相关性检验, 结果表明两组数据不存在显著性差异( $F=0.417, P=0.525$ ), 并且存在极显著正相关性( $r=0.992, P=0.000$ ), 因此NASA提供的海表温度遥感数据可较好反演研究海域表层的海水温度变化。

由NASA海表温度遥感数据提取的XSP经纬度的日平均海表温度拟合曲线见图6-b。研究期

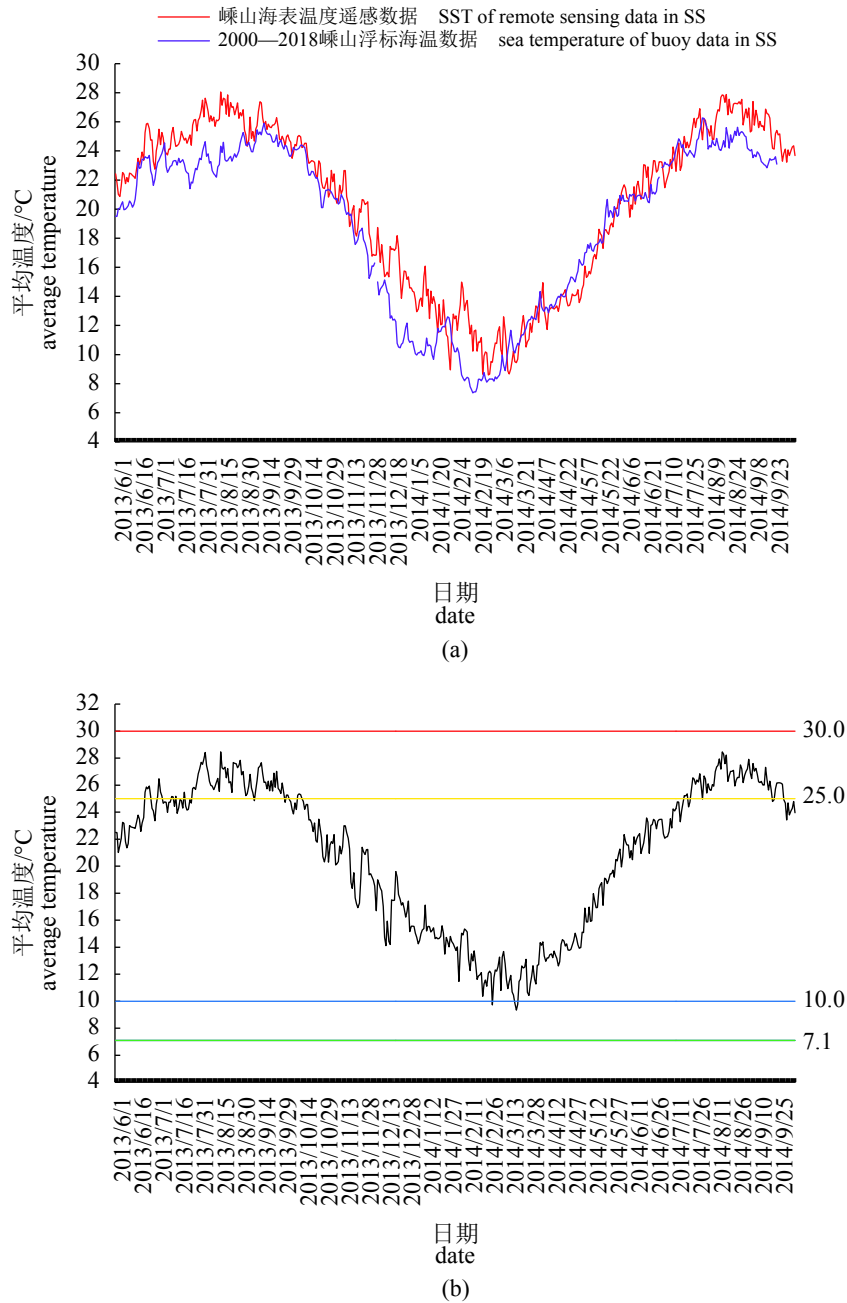


图 6 2013年6月—2014年9月嵊山(a)和小石浦(b)月平均海温分布

(b)中, 绿色.铜藻生物学零度和生存水温下限; 蓝色.铜藻生长水温下限; 黄色.铜藻生长水温上限; 红色.铜藻生存水温上限

Fig. 6 Monthly average temperature in SS (a) and XSP (b) from June 2013 to September 2014

In (b): green. lowest survival temperature, biological zero temperature of *S. horneri*; blue. lowest growth temperature of *S. horneri*; yellow. highest growth temperature of *S. horneri*; red. highest survival temperature of *S. horneri*; SS. Shengshan

间, XSP日平均海表温度随时间变化呈开口朝上抛物线型分布, 日平均海表温度分布范围为9.34~28.46 °C。月平均海表温度最大值为2013年8月的(26.94±0.82)°C, 月平均海表温度最小值为2014年3月的(11.79±1.19)°C。8月—翌年3月月平均海表温度呈下降趋势, 4—7月月平均海表温度呈上升趋势, 4—5月的月平均海表温度上升幅度最大。

净效积温 2013年5月底、6月初潜水观测时, 枸杞岛铜藻刚完成繁殖, 2014年5月底铜藻已进行有性繁殖, 因此本研究对铜藻的净效积温计算时间范围界定为2013年6月1日—2014年5月31日, 为反映研究海域铜藻净效温度的周年变化, 净效温度的计算时间范围界定为2013年6月1日—2014年9月31日。根据图7中的净效温度

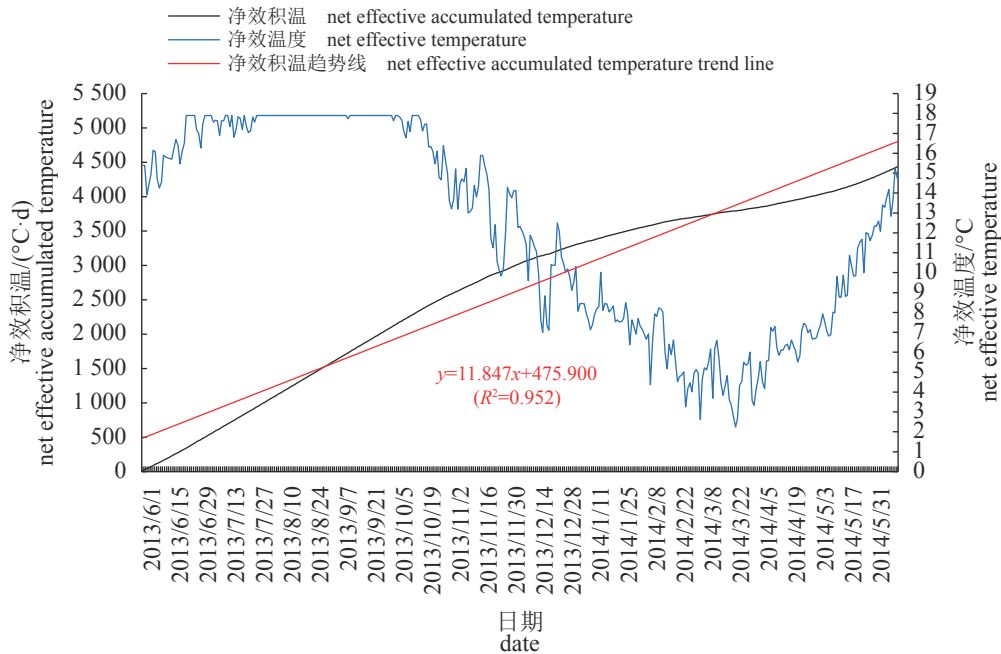


图7 2013年6月—2014年5月枸杞岛铜藻的净效积温和净效温度

Fig. 7 Net effective accumulated temperature and net effective temperature of *S. horneri* in Gouqi Island from June 2013 to May 2014

曲线的变化,可划分为3个时期:7—9月的饱和净效温度期、10月—翌年2月的净效温度衰减期和3—6月的净效温度增长期,其中2013年7—9月净效温度恒定于17.9 °C,10月3日开始出现波动下降,日均净效温度最低值出现在2014年3月13日的2.24 °C,数日后净效温度呈波动上升,直至7月12日后恢复至17.9 °C。

铜藻的净效积温随时间变化呈显著的线性关系: $y = 11.847x + 475.900 (R^2 = 0.952)$ ,研究期间铜藻完成生活史所需的净效积温为4 434.75 °C·d;气囊于9月开始出现时所需的净效积温为1 853.47 °C·d,占总净效积温的41.79%;气囊于4月生长达到峰值所需的净效积温为3 611.25 °C·d,占总净效积温的81.43%。

### 3 讨论

#### 3.1 海温变化与海流的关系

在图7中净效温度的衰减期和增长期两个阶段中,净效温度总体随时间先减小后增大,但是在变化过程中出现了剧烈波动。如2013年12月9日—15日,研究海域的净效温度迅速下降;2014年2月3日—7日,净效温度逆势出现升温现象。该海域海温出现剧烈波动现象的原因,主要与我国沿海季风变化导致的海流变动有关<sup>[26]</sup>。

11月—翌年1月,东海冬季风盛行,产生的自北向南的苏北沿岸流强大且影响范围逐渐扩展<sup>[27]</sup>,2013年12月9日—15日,有股冷水团南下侵入研究海域导致海温骤降(图8-a, 8-b);2—5月季风处于转换阶段,南向的苏北沿岸流逐渐减弱,向北收缩至杭州湾附近,并与外海暖流系统汇合在一起<sup>[28]</sup>,导致海温时升时降(图8-c和8-d)。

#### 3.2 海温变化对铜藻株高、株重的影响

研究海域全年日平均海表温度分布范围为9.34~28.46 °C,在铜藻生存温度范围内(图6)。孙建璋等<sup>[24-25]</sup>研究认为人工栽培的铜藻在海温低于10 °C的低温期能达到最高生长率,高于25.0 °C则停止生长。而本研究中,XSP站点日平均海温低于10 °C的时间段为1月下旬至3月上旬,该时期铜藻的生长速率最低,仅为1.29 mm/d,这与孙建璋等<sup>[24]</sup>的研究结果不同,原因可能是本研究中缺乏2月的铜藻生长数据,无法很好地反映低温期铜藻的生长情况;也可能由于本研究是基于自然海域条件下的铜藻生物学调查,孙建璋等<sup>[25]</sup>的研究结果是基于人工栽培的铜藻生物学测定,实验条件不同所致。本研究中铜藻生长率最大的时期为3—5月,该时期内海温为9.34~22.34 °C,且海温随时间逐渐升高,低温期后的升温条件可能是诱发铜藻快速生长的因素之一<sup>[29-30]</sup>。



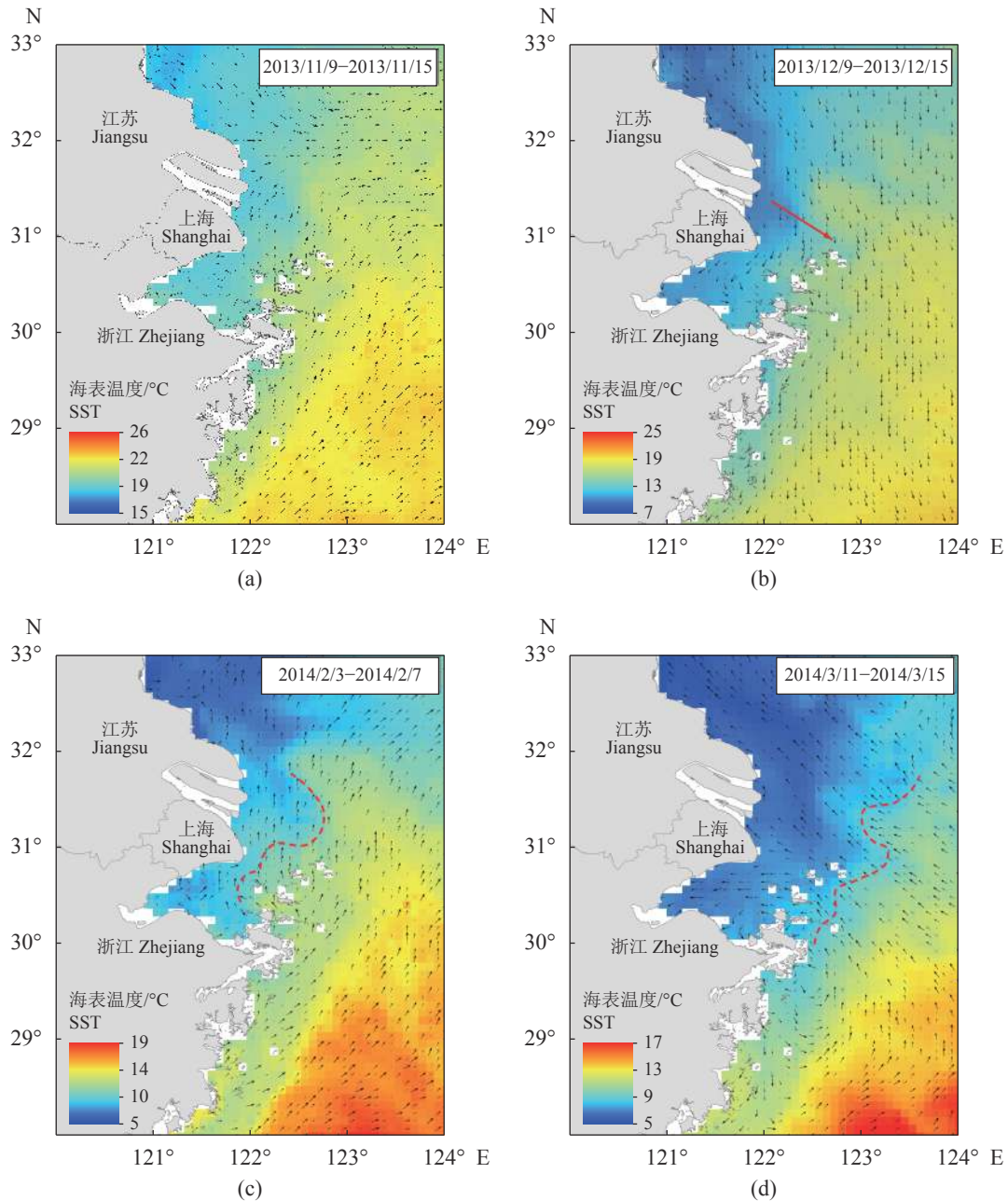


图 8 2013年11月(a)、12月(b)和2014年2月(c)、3月(d)东海海流和海温分布

黑色小箭头.海流移动方向;红色箭头.冷水团移动方向;红色虚线.冷暖气团交汇锋面

Fig. 8 Sea current and sea temperature of East China Sea in November (a), December (b) 2013 and February (c), March (d) 2014

Black small arrow. current moving direction; red arrow. cold water mass moving direction; red dashed line. cold water and warm water mixing front

饱和净效温度期中, 7—9月的日平均海温均高于25.0 °C, 且逐渐升高至最高值28.46 °C, 此期间的铜藻处于幼苗阶段, 平均株高不足20 cm, 铜藻的生长速率处于夏季高温时期的休眠—缓慢生长过程, 这与海温的持续偏高存在极显著正相关( $r=0.927, P=0.023$ ), 表明较高的海温可限制铜藻的生长(图7)。

### 3.3 气囊形态特征对环境因子变化的响应

铜藻气囊具有一定的浮力, 使得植株保持直立, 甚至漂浮于海面生长<sup>[19]</sup>。随着铜藻植株的不断长高增重, 藻体对气囊浮力的需求量逐渐增加, 因此气囊数量和体积变化与铜藻植株的生长变化有关, 而铜藻的生长又受限于海水温度。有研究表明, 部分马尾藻种类气囊的形成

时间及多少与海温变化有关<sup>[31-32]</sup>。本研究中铜藻气囊的数量大幅增加始于2013年11月,基本与铜藻净效温度开始进入衰减期的时间相符。随着时间变化,气囊数量逐渐增加。当海温从3月进入净效温度的增长期后,气囊数量显著增加。顶部主侧枝气囊总体积于4月起达到并维持在3 500~3 800 mm<sup>3</sup>,中部主侧枝气囊总体积于6月达到3 500 mm<sup>3</sup>。5—6月铜藻已发育成熟,因此气囊的总体积也达到最大值。

#### 4 结论

研究期间,枸杞岛海域铜藻植株在9月开始出现气囊,幼孢子体着床至气囊开始出现时所需的净效积温为1 853.47 °C·d。翌年3—4月,主侧枝的气囊数量快速增长,4月每根主侧枝平均气囊数量达最大,气囊发育成熟,幼孢子体着床至4月气囊生长发育达到峰值所需的净效积温为3 611.25 °C·d。铜藻完成生活史所需的净效积温为4 434.75 °C·d。铜藻气囊的生长发育与海温的变化有关,海水低温期后的升温条件可能是诱发铜藻快速生长的因素,较高的海温可限制铜藻的生长。

#### 参考文献:

- [1] 黄宗国. 海洋生物学辞典[M]. 北京: 海洋出版社, 1994: 31.  
Huang Z G. Dictionary of marine biology[M]. Beijing: China Ocean Press, 1994: 31 (in Chinese).
- [2] 刘正一, 庞云龙, 郭伟, 等. 漂浮海藻与海藻区系的关系[J]. 海洋科学集刊, 2016(51): 323-327.  
Liu Z Y, Pang Y L, Guo W, et al. Relationship between floating seaweeds and seaweed flora[J]. *Studia Marina Sinica*, 2016(51): 323-327(in Chinese).
- [3] 黄冰心, 丁兰平, 秦松, 等. 铜藻的分类地位、生物地理分布以及2016年底黄海漂浮铜藻源头的初步分析[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(1): 214-223.  
Huang B X, Ding L P, Qin S, et al. The taxonomical status and biogeographical distribution of *Sargassum horneri* with the origin analysis of its drifting population in the end of 2016 at the western Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(1): 214-223(in Chinese).
- [4] Komatsu T, Tatsukawa K, Filippi J B, et al. Distribution of drifting seaweeds in eastern East China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 67(3-4): 245-252.
- [5] Hawes N A, Taylor D I, Schiel D R. Transport of drifting fucoid algae: nearshore transport and potential for long distance dispersal[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2017, 490: 34-41.
- [6] Rodil I F, Olabarria C, Lastra M, et al. Differential effects of native and invasive algal wrack on macrofaunal assemblages inhabiting exposed sandy beaches[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 358(1): 1-13.
- [7] Yamasaki M, Aono M, Ogawa N, et al. Drifting algae and fish: Implications of tropical *Sargassum* invasion due to ocean warming in Western Japan[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 147: 32-41.
- [8] De Medeiros Fernandes N C F, Da Silva Júnior C A B, Feitosa C V, et al. Seasonal influence of drifting seaweeds on the structure of fish assemblages on the eastern equatorial Brazilian coast[J]. *Brazilian Journal of Oceanography*, 2016, 64(4): 365-373.
- [9] 曾呈奎, 陆保仁. 中国海藻志(第三卷褐藻门第二册墨角藻目)[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 43-44.  
Zeng C K, Lu B R. Marine algal flora of China, Volume 3 Phaeophyta, No.2 Fucales[M]. Beijing: Science Publishing Press, 2000: 43-44(in Chinese).
- [10] 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.
- [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] 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.
- [13] Kim H, Sanjeewa K K A, Fernando I P S, 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.
- [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] Lin S M, Huang R, Ogawa H, et al. Assessment of 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- germling ability of the introduced marine brown alga, *Sargassum horneri*, in northern Taiwan[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2017, 29(5): 2641-2649.
- [16] Qi L, Hu C M, Wang M Q, *et al.* Floating algae blooms in the East China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(22): 11501-11509.
- [17] 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.
- [18] 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.  
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(in Chinese).
- [19] 庞云龙, 刘正一, 丁兰平, 等. 山东半岛漂浮铜藻和底栖铜藻气囊及生殖托的形态学比较分析[J]. *海洋科学*, 2018, 42(3): 84-91.  
Pang Y L, Liu Z Y, Ding L P, *et al.* Morphological comparison and analysis of the vesicle and receptacle of floating and attached *Sargassum horneri* in Shandong Peninsula[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(3): 84-91(in Chinese).
- [20] 章守宇, 毕远新, 吴祖立. 枸杞岛铜藻空间分布格局初探[J]. *水产学报*, 2013, 37(6): 884-893.  
Zhang S Y, Bi Y X, Wu Z L. Spatial distribution pattern of *Sargassum horneri* around Gouqi Island, Shengsi, China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(6): 884-893(in Chinese).
- [21] 诸邈莹, 刘洪生, 张婧雯. 枸杞岛周围底栖藻分布的回声探测及其插值研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2012, 21(3): 445-451.  
Zhu LY, Liu H S, Zhang J W. Research on the benthic algae distribution around Gouqi Island using digital echo sounding system and interpolation[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(3): 445-451(in Chinese).
- [22] 陈亮然, 章守宇, 陈彦, 等. 枸杞岛马尾藻场铜藻的生命史与形态特征[J]. *水产学报*, 2015, 39(8): 1218-1229.  
Chen L R, Zhang S Y, Chen Y, *et al.* Life history and morphology of *Sargassum horneri* from the *Sargassum* seaweed bed of Gouqi Island[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(8): 1218-1229(in Chinese).
- [23] 肖静, 李楠, 姜会飞. 作物发育期积温计算方法及其稳定性[J]. *气象研究与应用*, 2010, 32(2): 64-67.
- Xiao J, Li N, Jiang H F. Calculation and stability of accumulated temperatures in the growing season of winter wheat[J]. *Journal of Guangxi Meteorology*, 2010, 32(2): 64-67(in Chinese).
- [24] 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.  
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(in Chinese).
- [25] 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.  
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(in Chinese).
- [26] 李鹏, 杨世伦, 陈沈良. 浙南近岸海流季节变化特征[J]. *海洋学报*, 2014, 36(3): 19-29.  
Li P, Yang S L, Chen S L. Primary analysis of current condition and seasonal variation in southern Zhejiang[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(3): 19-29(in Chinese).
- [27] 朱平, 吴辉. 夏季长江口与苏北海域之间的水体运动及其对动力因子的响应[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2018(4): 171-183.  
Zhu P, Wu H. Water mass transport and its controlling mechanisms between the Changjiang Estuary and Subei Coastal Water during the summer[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science Edition)*, 2018(4): 171-183(in Chinese).
- [28] 李鹏, 王思荐, 李延刚, 等. 浙江近海夏季流场特征分析[J]. *海洋学研究*, 2014, 32(3): 16-25.  
Li P, Wang S J, Li Y G, *et al.* Current conditions in summer in the Zhejiang offshore[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2014, 32(3): 16-25(in Chinese).
- [29] 张婧, 严兴洪, 章守宇. 铜藻受精卵的早期发生与幼孢子体发育观察[J]. *水产学报*, 2012, 36(11): 1706-1716.  
Zhang J, Yan X H, Zhang S Y. Observations on embryology of zygotes and early development of juvenile sporophytes in *Sargassum horneri*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(11): 1706-1716(in Chinese).
- [30] 张鹏, 王铁杆, 钟晨辉, 等. 铜藻苗种繁育研究[J]. *水生生物学报*, 2018, 42(2): 428-438.  
Zhang P, Wang T G, Zhong C H, *et al.* Study on seed breeding of *Sargassum horneri*[J]. *Acta Hydrobiologica*

- Sinica*, 2018, 42(2): 428-438(in Chinese). 1287.
- [31] Zubia M, Andrefouët S, Payri C. Distribution and biomass evaluation of drifting brown algae from Moorea Lagoon (French Polynesia) for eco-friendly agricultural use[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2015, 27(3): 1277-1287.
- [32] Mizuno S, Ajisaka T, Lahbib S, *et al.* Spatial distributions of floating seaweeds in the East China Sea from late winter to early spring[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2014, 26(2): 1159-1167.

## Morphological characteristics of vesicle of *Sargassum horneri* and its relationship to environmental factors in Gouqi Island

WU Zuli<sup>1,2,3</sup>, CHEN Liangran<sup>4</sup>, WANG Kai<sup>2</sup>, ZHANG Shouyu<sup>2\*</sup>, BI Yuanxin<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for

Fishery Resource of Zhejiang Province, Marine Fishery Institute of Zhejiang Province, Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources for Key Fishing Grounds, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhoushan 316021, China;

2. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Science, Shanghai 200090, China;

4. School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to better analyze the possibility that the floating *Sargassum horneri* in East China Sea originated from benthic *S. horneri* in Zhoushan sea area, and provide an ecological reference for effective tracking and monitoring of floating *Sargassum*, morphological characteristics of vesicle of *S. horneri* and its relationship to environmental factors were investigated. The results showed that algae began to have vesicle in September, and have a highest growth rate from March to May. The number of vesicles in the main side branches increased rapidly from March to April, and reached a maximum in April. The number, average length, average wet weight and average volume of vesicles in each month outnumbered in top main side branch than those in middle and bottom main side branches, but the average diameter was relatively uniform. The net effective accumulated temperature needed by *S. horneri* to complete the life history was 4 434.75 °C·d. Vesicle germinating net effective accumulated temperature in September was 1 853.47 °C·d, and development completing net effective accumulated temperature in April was 3 611.25 °C·d. The sea surface temperature change in the study area is mainly affected by the current changes caused by monsoon activity. The warming condition after a low temperature period of sea water may be the factor that induces the rapid growth of *S. horneri*, and higher sea temperature may limit algae growth.

**Key words:** *Sargassum horneri*; net effective accumulated temperature; floating algae; golden tides; marine ranching; seaweed beds; Gouqi Island

**Corresponding authors:** ZHANG Shouyu. E-mail: syzhang@shou.edu.cn;

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

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (41876191); Open Foundation from Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for Fishery Resource of Zhejiang Province (2016RF005); China Agriculture Research System (CARS-50); Foundation from Science Technology Department of Zhejiang Province (LGN18C030003, 577767901)