

DOI: 10.12264/JFSC2024-0343

## 枸杞岛近岸海域漂浮铜藻发生量及其来源

朱伟栋<sup>1</sup>, 杨起帆<sup>1</sup>, 王惠杰<sup>1</sup>, 苗航<sup>1</sup>, 刘峰宇<sup>1</sup>, 秦朋杰<sup>1</sup>, 毕远新<sup>1,2</sup>

1. 浙江海洋大学海洋与渔业研究所, 浙江 舟山 316021;

2. 浙江省海洋水产研究所, 浙江省海水增养殖重点实验室, 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:** 为探究枸杞岛近岸海域漂浮铜藻(*Sargassum horneri*)发生量及其来源, 本研究以枸杞岛筏架定生和底栖铜藻为研究对象, 根据定生铜藻生长、气囊形成时间及生物量变化规律, 从源头上解析漂浮铜藻发生时间、生物量及漂浮路径。结果表明: (1)来源于筏架定生的漂浮铜藻形成时间比来源于底栖的漂浮铜藻早 5~6 个月, 枸杞岛近岸海域约 99.12%的漂浮铜藻生物量来源于筏架定生铜藻, 而底栖铜藻形成的漂浮铜藻生物量仅占 0.88%。(2)筏架定生铜藻脱离附着基后形成的漂浮铜藻株数约  $22 \times 10^6$  株, 生物量约 141938 t, 经估算仅枸杞岛筏架定生来源的漂浮铜藻生物量约占东海区漂浮铜藻总量的 23.36%, 底栖来源的铜藻约占 0.21%。(3)结合我国不同区域定生铜藻生物量、漂浮铜藻出现时间、潮流及长江环锋影响铜藻漂浮路径等因素分析, 我国漂浮铜藻可能有两条路径来源, 北面来源为辽东半岛和山东附近海域, 南面为长江河口以南区域。以上研究结果可为解析枸杞岛近岸海域漂浮铜藻来源及预测发生可能性提供参考, 同时也可作为“金潮”溯源提供依据。

**关键词:** 漂浮铜藻; 气囊; 相对生长速率; 漂浮路径; 黄东海区; 金潮

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)04-0502-11

铜藻(*Sargassum horneri*)是北太平洋西部地区一种特有的暖温带性藻类<sup>[1]</sup>, 凭借固着器可定生在近岸岩礁或养殖筏架设施上。定生铜藻在物理和生物作用下, 脱离附着基或断裂后可漂浮于海面<sup>[2]</sup>。漂浮铜藻规模性的聚集和暴发式的增长, 导致近年来我国黄东海区“金潮”现象频发<sup>[3-7]</sup>。为探究“金潮”的形成原因, 确定漂浮铜藻暴发的原因成为关键。但由于漂浮铜藻暴发范围广、漂浮周期长及漂浮路径复杂, 在判别漂浮铜藻来源上存在困难。现有判别漂浮铜藻来源的方法主要借助卫星遥感<sup>[8-10]</sup>、分子鉴定<sup>[11-15]</sup>等相关手段。而仅依靠卫星遥感很难区分同一区域内不同生境下的铜藻来源、早期漂浮铜藻起源及漂浮路径<sup>[16-17]</sup>; 分子鉴定所采集的样本大多为底栖和漂浮铜藻,

在样本来源判定上存在不确定性, 基因溯源更为复杂。因此, 在漂浮铜藻早期发生阶段研究定生铜藻脱离附着基的生物量变化和生长规律, 对量化漂浮铜藻生物量和解析漂浮铜藻来源具有重要意义。

铜藻气囊的形成是支撑藻体漂浮不可或缺的条件之一。当铜藻脱离附着基或断裂后, 借助气囊提供的浮力作用漂浮于海面, 辅以营养繁殖的方式继续存活<sup>[18-19]</sup>。吴祖立等<sup>[20]</sup>通过研究枸杞岛底栖铜藻气囊形成时间, 发现底栖铜藻在翌年 3—4 月主侧枝气囊数量显著增加, 翌年 4 月主侧枝的气囊数量达最大。朱旗等<sup>[18]</sup>对比定生型和漂浮型铜藻气囊, 发现漂浮型铜藻气囊数量更多。上述研究分析了铜藻气囊形成时间及数量差异, 但铜藻

收稿日期: 2024-11-07; 修订日期: 2025-01-07.

基金项目: 浙江省基础公益项目(LTGS24C030002); 浙江省重点研发计划项目(2023C03120); 舟山市科技计划项目(2022C31054).

作者简介: 朱伟栋(1998–), 男, 硕士研究生, 研究方向为大型海藻生态修复. E-mail: 1064536824@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

气囊和藻体浮力有关时间的研究较少。由此, 探究定生铜藻气囊的形成与气囊浮力能支撑藻体漂浮的时间是判别漂浮铜藻发生的关键要素。

查清筏架定生和底栖铜藻脱离附着基后形成的漂浮铜藻规模占比, 是判别漂浮铜藻生物量来源的重要依据。当前, 枸杞岛贻贝筏式养殖规模较大, 筏架设施中定生着大量的铜藻, 在离筏架设施不远的近岸岩礁上也分布着一定数量的底栖铜藻。但各类因素影响及外界干扰导致底栖铜藻规模正逐年减少<sup>[21-23]</sup>, 枸杞岛底栖铜藻生物量调查上也表现出这一趋势<sup>[2,24]</sup>。由此认为, 底栖铜藻在分布和数量上难以形成庞大的漂浮铜藻群体。Qi等<sup>[16]</sup>通过卫星监测及遥感分析发现1月枸杞岛附近有漂浮铜藻出现, 且当地有底栖铜藻种群存在; 丁晓玮等<sup>[25]</sup>通过走航线的调查方式对长江口附近海域的漂浮铜藻进行监测, 发现浙江舟山附近海域漂浮铜藻生物量较大, 同时枸杞岛贻贝养殖区中定生大量铜藻。目前, 对于漂浮铜藻来源的研究主要集中在筏架定生和底栖两种生境上。受调查方式的局限, 在判别漂浮铜藻生物量具体来源于筏架定生或底栖铜藻方面未有清晰的界定, 因此有必要从枸杞岛筏架定生和底栖铜藻来源的漂浮铜藻生物量组成和差异上加以判别。

为解析枸杞岛近岸海域漂浮铜藻发生量及其来源, 本研究调查了枸杞岛筏架定生和底栖铜藻生物量变化及脱离附着基后形成漂浮铜藻的生物量差异, 探讨定生铜藻的生长、气囊形成时间、生物量变化规律, 以期建立枸杞岛近岸海域漂浮铜藻发生来源与东海区漂浮铜藻生物量之间的关系, 解析导致漂浮铜藻大规模出现的成因, 为“金潮”防控及海藻场修复和利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地点概况及站点选择

枸杞岛位于浙江省舟山市嵊泗县马鞍列岛东部, 海岸线总长为 22.51 km, 受长江河口冲击影响, 丰富的营养盐为当地贻贝筏式养殖提供了良好的基础。目前贻贝养殖区面积约为 14.87 km<sup>2</sup><sup>[26]</sup>, 在养殖筏架设施中定生着大量的铜藻。筏架定生

铜藻调查地点选择枸杞岛贻贝养殖区西北侧进行采样, 以岸线为起始设立了 3 个断面: F1、F5 为近岸站点, F3 为养殖区中部, F2、F4 为靠外站点; 底栖铜藻调查选取了 5 个代表性的站点, 其中 D1、D3 位于枸杞岛西北侧贻贝养殖区附近, D2 位于 D1 站点的西南侧, D4、D5 位于内湾处(图 1)。

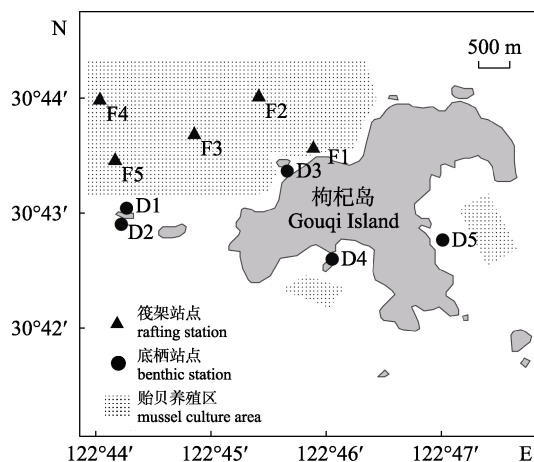


图1 本研究调查站点

Fig. 1 Sampling stations in the study

### 1.2 实验设计

**1.2.1 筏架定生铜藻采样调查实验** 筏架定生铜藻采样时间为 2018 年 9 月至 2019 年 4 月, 其中 2018 年 12 月和 2019 年 3 月由于海况原因, 未采集到有效样本, 2019 年 5—6 月铜藻已衰败, 未观测到藻体。按月采集筏架设施中主梗绳和吊养贻贝绳上的定生铜藻并装袋编号(图 2)。同时记录采样绳长(m), 并于当天将所采藻体运回实验室, 逐月记录筏架定生铜藻密度和湿重生物学参数。

**1.2.2 底栖铜藻调查实验** 底栖铜藻环岛调查实验于 2023 年 10—11 月, 对枸杞岛底栖铜藻进行采样调查(图 3), 但由于时间条件限制, 未能对成藻期铜藻进行环岛采样。采样船只抵岸后目测底栖铜藻密度, 将其分为低、中、高 3 个密度分区, 在 3 个分区中分别采集 8 个样方, 采用 30 cm×30 cm 样方框进行随机取样。记录样方内铜藻的密度和湿重生物学参数, 并通过谷歌地图中的测距工具对不同密度分区位置进行标注及测量岸线长度, 绘制出相应的不同密度岸线分布图。



图 2 筏架定生铜藻

a. 筏架定生铜藻; b. 筏架主梗绳定生铜藻; c. 筏架吊养贻贝定生铜藻.

Fig. 2 *Sargassum horneri* attaching to raft

a. *Sargassum horneri* attached to raft; b. *Sargassum horneri* attached to raft main stem rope;

c. *Sargassum horneri* attached to mussels suspending on raft.

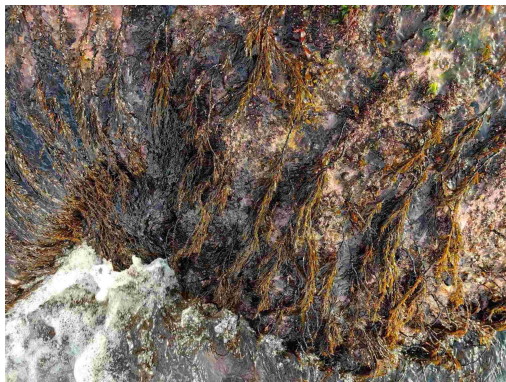


图 3 底栖铜藻

Fig. 3 Benthic *Sargassum horneri*

1.3 调查方法

1.3.1 筏架定生铜藻密度和单位面积生物量估算

分别计算单位面积内筏架定生铜藻对应的株数和湿重。枸杞岛贻贝养殖总面积约为 14.87 km<sup>2</sup> (贻贝养殖总面积计算以 14866666 m<sup>2</sup> 为标准), 每 666.67 m<sup>2</sup> 下约有 4 根主绳, 绳与绳间距为 4 m, 每根绳长约为 55.58 m (图 4)。单位面积内对应的株数计算方法为: 单位面积内对应的株数=4 根主绳长度×每米绳上的株数/666.67 m<sup>2</sup>, 即单位面积对应的铜藻密度; 单位面积内生物量的计算方法为: 单位面积内生物量=666.67 m<sup>2</sup> 下的铜藻总湿重/666.67 m<sup>2</sup>。将单位面积内铜藻的密度和贻贝养殖总面积相乘, 可估算出筏架定生铜藻的总株数。

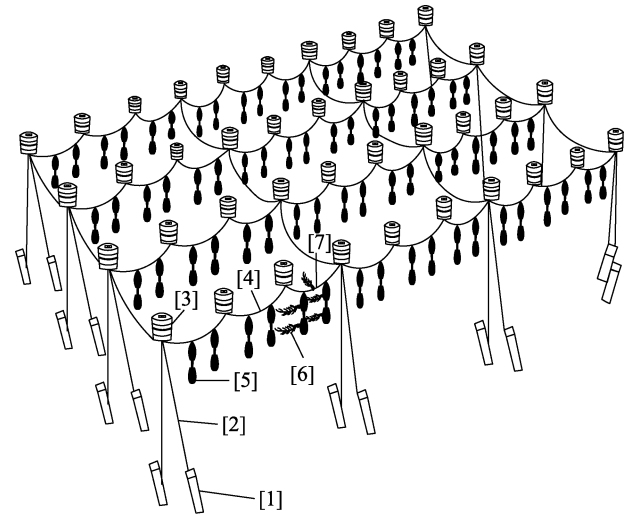


图 4 枸杞岛贻贝养殖筏架结构

1. 锚桩; 2. 锚绳; 3. 浮球; 4. 主梗绳; 5. 贻贝苗绳; 6. 贻贝定生铜藻; 7. 主梗绳上定生铜藻.

Fig. 4 Structure of the mussel culture raft

1. Anchor block; 2. Mooring lines; 3. Bouys; 4. Raft rope;

5. Mussels string; 6. *Sargassum horneri* attached to mussels;

7. *Sargassum horneri* attached to raft main stem rope.

1.3.2 底栖铜藻分布宽幅面积估算 为进一步评估枸杞岛底栖铜藻分布宽幅情况。依据先前调查底栖铜藻 5 个采样站点的垂直分布水深距离, 以及各站点的潮间带有铜藻分布的上限至潮下带无铜藻分布下限的水平距离, 通过勾股定理计算出 5 个站点底栖铜藻分布的宽幅后再取平均值, 即为底栖铜藻分布宽幅的平均值。随后结合底栖铜

藻分布宽幅的平均值和底栖铜藻密度岸线分布长度, 两者进行近似长方形面积的计算, 估算出枸杞岛底栖铜藻的分布宽幅面积。由于实验条件有限不能潜水并直接测量海藻床宽幅, 需经过公式(1)计算得出宽幅:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1)$$

式中,  $a$  为铜藻在潮间带上限至潮下带下限分布的垂直距离差;  $b$  为垂直于岸线近端潮间带有铜藻分布的上限至潮下带无铜藻分布下限的水平距离;  $c$  为  $a, b$  两边的斜边(忽略底质高低起伏等情况, 以最小斜边距离进行计算, 即底栖铜藻分布的宽幅长度)。

**1.3.3 筏架定生和底栖铜藻损失后形成漂浮铜藻株数与生物量估算** 筏架定生和底栖铜藻损失后, 需根据藻体气囊的形成和气囊浮力能支撑藻体漂浮的时间进行漂浮铜藻株数和生物量的评估。筏架定生铜藻损失后形成漂浮铜藻的总株数=单位面积内筏架定生铜藻形成漂浮铜藻的密度损失量 $\times$ 贻贝养殖总面积; 底栖铜藻损失后形成漂浮铜藻总株数=[(单位面积内低、中、高三个密度分区的底栖铜藻密度 $\times$ 对应分布面积)后累加] $\times$ 幼苗至成藻期密度损失率。其次通过漂浮铜藻株数及杨起帆等<sup>[27]</sup>模拟漂浮铜藻相对生长速率, 估算出筏架定生和底栖铜藻损失后形成漂浮铜藻的生物量。

## 1.4 数据处理与分析

铜藻湿重采用电子天平称量(精度为 0.01 g), 采用 Excel 软件整理数据, Origin 2021 进行绘图, 采样站点图用 ArcMap 10.8 软件绘制。描述性统计值采用平均值 $\pm$ 标准误( $\bar{x} \pm SE$ )表示。采用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 采用铜藻的湿重变化来表示相对生长速率(relative growth rate, RGR), RGR 计算公式<sup>[28]</sup>如下:

$$RGR(\% \cdot d^{-1}) = [\ln(W_t/W_0)/t] \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $W_t$  为  $t$  天后铜藻的鲜重,  $W_0$  为初始铜藻鲜重。

## 2 结果与分析

### 2.1 筏架定生铜藻密度和单位面积生物量的月变化规律

由图 5a 所示, 9 月至翌年 4 月筏架定生铜藻密度呈下降趋势。9 月初始密度最高, 为  $(3.32 \pm 1.01) \text{ ind/m}^2$ ; 10 月铜藻密度下降明显为  $(1.81 \pm 0.62) \text{ ind/m}^2$ , 与后续 11 月、翌年 1 月铜藻的密度相差不大; 翌年 2 月密度为  $(0.78 \pm 0.36) \text{ ind/m}^2$ , 4 月铜藻密度最低, 为  $(0.33 \pm 0.17) \text{ ind/m}^2$ 。在密度损失量方面, 10 月筏架定生铜藻密度损失量最大, 为  $1.51 \text{ ind/m}^2$ ; 11 月筏架定生铜藻密度损失量为  $0.08 \text{ ind/m}^2$ ; 翌年 2 月为  $1.04 \text{ ind/m}^2$ ; 翌年 4 月为  $0.45 \text{ ind/m}^2$ ; 其余月份损失量相差较小。

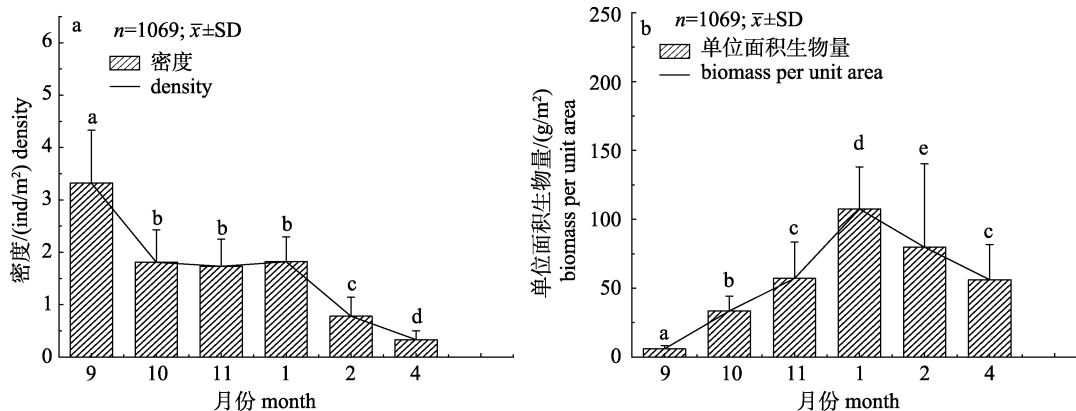


图5 筏架定生铜藻密度(a)和单位面积生物量(b)的月变化

a. 筏架定生铜藻密度变化; b. 筏架定生铜藻单位面积生物量变化。不同字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ )。

Fig. 5 Monthly changes in density (a) and biomass per unit area (a) of *Sargassum horneri* attached to rafts

a. Density changes of *Sargassum horneri* attached to raft; b. Changes in biomass per unit area of *Sargassum horneri* attached to raft. Different letters indicate significant differences between groups ( $P < 0.05$ ).

筏架定生铜藻单位面积的生物量情况由图 5b 所示, 9 月至翌年 4 月筏架定生铜藻单位面积的

生物量呈先增长后下降趋势。9 月铜藻处于着苗生长初期, 植株单位面积生物量较低, 平均为  $(5.95 \pm$

2.39) g/m<sup>2</sup>; 随时间变化铜藻藻体的分枝及叶片次序繁茂, 湿重不断增加, 其中翌年 1 月单位面积生物量最高, 平均为(107.45±30.61) g/m<sup>2</sup>; 当铜藻湿重增加时藻体所受波浪的拖拽力也逐渐增强, 导致翌年 1—4 月铜藻株数损失明显, 翌年 4 月筏架定生铜藻单位面积生物量最低, 平均为(56.16±25.54) g/m<sup>2</sup>。

2.2 底栖铜藻幼苗至成藻期的密度和单位面积生物量变化规律

如图 6 所示, 不同密度分区底栖铜藻岸线分布长度占比情况为低密度>中密度>高密度, 高密度分区铜藻的分布长度占总岸线的 5.21%, 中密度占 14.41%, 低密度占 33.87%, 无铜藻分布长度占 46.50%。底栖铜藻密度分布规律为北侧、西北侧较多, 西北侧外围有较大面积的贻贝养殖区受波浪影响较小; 东南侧分布适中, 外围也有小部分贻贝养殖区; 南侧分布稀疏, 仅在靠湾内侧有少许分布; 其余方向没有铜藻分布的地方多为沙滩和码头等地。

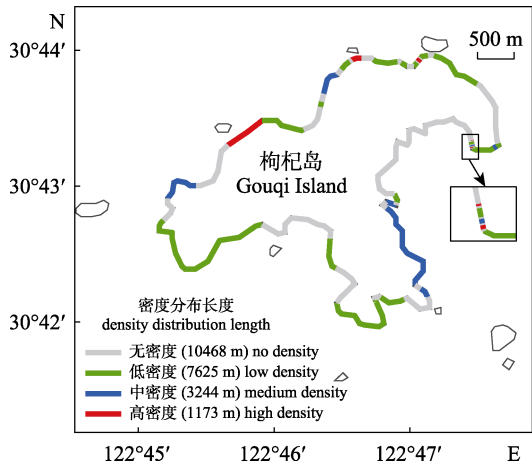


图 6 底栖铜藻密度分布图  
Fig. 6 Density distribution map of benthic *Sargassum horneri* in intertidal zone

在低、中、高 3 个不同密度分区下, 铜藻密度的疏密会对藻体生长产生制约影响, 低密度分区的铜藻在适宜密度分布下, 生长发育优于高密度分区铜藻(图 7)。低密度分区铜藻的密度为(62.90±15.48) ind/m<sup>2</sup>, 单位面积生物量为(34.45±8.66) g/m<sup>2</sup>; 中密度分区铜藻的密度为(225.17±24.06) ind/m<sup>2</sup>, 单位面积生物量为(33.11±5.37) g/m<sup>2</sup>; 高密度分

区铜藻的密度为(464.81±63.02) ind/m<sup>2</sup>, 单位面积生物量为(17.70±3.55) g/m<sup>2</sup>。

为评估枸杞岛底栖铜藻幼苗至成藻期的损失株数。由表 1 可知, 底栖铜藻海藻床宽幅平均值为(4.70±1.62) m。综合图 6, 结合底栖铜藻不同密度分区的初始密度和对应分布面积, 估算出底栖铜藻幼苗期的总株数。由于受时间限制, 未能对底栖铜藻的成藻期进行调查。依据底栖铜藻幼苗和成藻两个时期的密度平均损失率为 61%<sup>[29]</sup>, 估算得出枸杞岛底栖铜藻幼苗至成藻期损失株数约 5.03×10<sup>6</sup> 株。

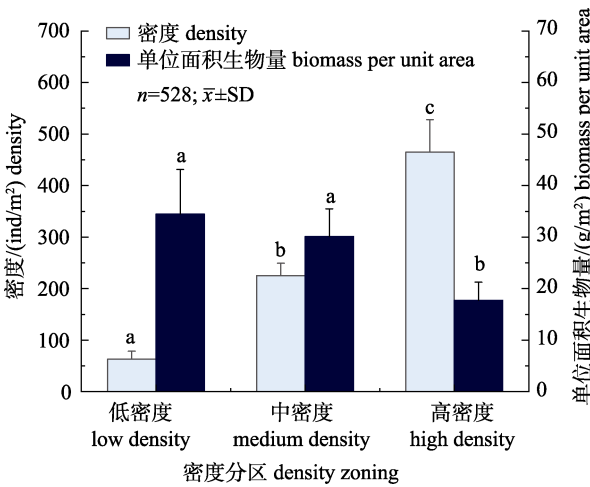


图 7 底栖铜藻不同密度分区的密度和单位面积生物量变化  
不同字母代表同一参数不同密度分区间差异显著(P<0.05).  
Fig. 7 Changes of density and biomass per unit area in different density zones of benthic *Sargassum horneri*. Different letters indicate significant difference between different density zones on the same parameter (P<0.05).

表 1 底栖铜藻海藻床宽幅参数统计  
Tab. 1 Algal bed width parameter statistics of benthic *Sargassum horneri*

| 参数<br>parameter                            | 底栖站点 benthic site |      |      |      |      | 平均值<br>average |
|--------------------------------------------|-------------------|------|------|------|------|----------------|
|                                            | D1                | D2   | D3   | D4   | D5   |                |
| 垂直距离差(a)/m<br>vertical distance difference | 3.29              | 1.66 | 1.88 | 1.96 | 2.22 | —              |
| 水平距离(b)/m<br>horizontal distance           | 6.12              | 2.08 | 5.06 | 3.31 | 4.08 | —              |
| 宽幅(c)/m width                              | 6.95              | 2.66 | 5.40 | 3.84 | 4.64 | 4.70±0.72      |

注: 表中“—”表示无该数据或该数据无意义。  
Note: — Indicates that there is no data or the data is meaningless.

2.3 筏架定生和底栖铜藻损失后形成漂浮铜藻的生物量情况

如表 2 和表 3 所示, 估算得出枸杞岛筏架定生和底栖铜藻初始株数分别为 49357331 株、8249796 株, 筏架定生铜藻株数约是底栖铜藻的 6 倍。枸杞岛筏架定生和底栖铜藻脱离附着基后形成的漂浮铜藻生物量情况如表 2 和表 3 所示。调查发现枸杞岛筏架定生铜藻形成漂浮铜藻的时间最早为 10 月末。如表 2 所示, 估算得出筏架定生铜藻 10 月末至翌年 4 月总损失株数约  $22\times10^6$  株, 形成漂浮铜藻的生物量约 141938 t, 该阶段损失的株数和生物量可能为漂浮铜藻提供生物量基础; 10 月末以前筏架定生铜藻的损失株数约  $22.45\times10^6$  株, 受铜藻气囊形成时间及浮力作用影响, 该阶段不具备形成漂浮铜藻条件, 铜藻脱离附着基后

会受自身重力影响沉降到海底, 不计入漂浮铜藻生物量来源; 最终枸杞岛筏架定生铜藻剩余铜藻株数约  $4.90\times10^6$  株。底栖铜藻气囊的数量能为藻体提供浮力时间最早为翌年 3 月末或更晚, 依据漂浮铜藻出现时间及单株铜藻脱离附着基后形成的漂浮铜藻生物量, 估算得出漂浮铜藻的生物量约 1261 t。受调查时间局限影响, 翌年 3 月末至 5 月末所损失的株数为底栖铜藻幼苗至成藻期损失的株数, 会导致估算出的漂浮铜藻生物量大于实际形成的漂浮铜藻生物量。筏架定生和底栖铜藻损失后形成漂浮铜藻的株数约为  $27.03\times10^6$  株, 生物量约 143199 t。整体上, 筏架定生铜藻损失后形成漂浮铜藻的生物量占漂浮铜藻总生物量的 99.12%, 而底栖铜藻形成的漂浮铜藻生物量仅为总生物量的 0.88%。

表 2 筏架定生铜藻参数统计  
Tab. 2 Parameter statistics of *Sargassum horneri* attaching to raft

| 采样日期<br>sampling<br>date | 初始铜藻湿重/g<br>initial wet weight<br>of <i>Sargassum</i><br><i>horneri</i> | 间隔时<br>间/d<br>interval<br>time | 相对生长速<br>率/(%/d)<br>relative<br>growth rate | t 天后铜藻的湿重/g<br>wet weight of<br><i>Sargassum</i><br><i>horneri</i><br>after t days | 剩余株数/株<br>number<br>of remaining<br>plants | 损失株数/株<br>number<br>of lost<br>plants | 漂浮铜藻<br>生物量/t<br>floating<br>seaweed<br>biomass | 备注<br>note                           |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 2018.09.10               | 1.81                                                                    | —                              | —                                           | —                                                                                  | 49357331                                   | —                                     | —                                               | 首次采样 first sampling                  |
| 2018.10.18               | 18.47                                                                   | —                              | —                                           | —                                                                                  | 26908665                                   | 22448666                              | —                                               | 无法漂浮 unable to float                 |
| 2018.11.02               | 28.55                                                                   | 173                            | 4.68                                        | 93719.06                                                                           | 25719333                                   | 1189332                               | 111463                                          | 可漂浮 floatable                        |
| 2019.01.23               | 61.67                                                                   | —                              | 4.68                                        | —                                                                                  | —                                          | —                                     | —                                               | 差异不明显<br>difference is insignificant |
| 2019.02.24               | 123.11                                                                  | 60                             | 4.68                                        | 2040.76                                                                            | 11595999                                   | 14123334                              | 28822                                           | 可漂浮 floatable                        |
| 2019.04.24               | 247.19                                                                  | —                              | 4.68                                        | —                                                                                  | 4906000                                    | 6689999                               | 1653                                            | 可漂浮 floatable                        |
| 合计 total                 | —                                                                       | —                              | —                                           | —                                                                                  | 4906000                                    | 44451331                              | 141938                                          | —                                    |

注: 表中“—”表示无该数据或该数据无意义。  
Note: — Indicates that there is no data or the data is meaningless.

表 3 底栖铜藻参数统计  
Tab. 3 Parameter statistics of benthic *Sargassum horneri*

| 采样日期<br>sampling date | 初始铜藻<br>湿重/g<br>initial wet weight<br>of <i>Sargassum</i><br><i>horneri</i> | 间隔<br>时间/d<br>interval<br>time | 相对生长速<br>率/(%/d)<br>relative<br>growth rate | t 天后铜藻的湿<br>重/g wet weight<br>of <i>Sargassum</i><br><i>horneri</i> after<br>t days | 剩余株<br>数/株<br>number of<br>remaining<br>plants | 损失株<br>数/株<br>number<br>of lost<br>plants | 漂浮铜藻<br>生物量/t<br>floating<br>seaweed<br>biomass | 备注<br>note          |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------|
| 2023.11.14            | 1.89                                                                        | —                              | —                                           | —                                                                                   | 8249796                                        | —                                         | —                                               | 首次采样 first sampling |
| 2024.05.27            | —                                                                           | 195                            | —                                           | —                                                                                   | 3217420                                        | —                                         | —                                               | 末次采样 last sampling  |
| 2024.03.31–2024.05.27 | 17.4                                                                        | 57                             | 4.68                                        | 250.65                                                                              | —                                              | 5032376                                   | 1261                                            | 可漂浮 floatable       |

注: 表中“—”表示无该数据或该数据无意义。  
Note: — Indicates that there is no data or the data is meaningless.

### 3 讨论

#### 3.1 枸杞岛近岸海域漂浮铜藻形成时间及来源判别

枸杞岛海域的筏架定生和底栖铜藻无法度夏,均为 1 年生,新生补充群体也由定生铜藻通过有性繁殖产生<sup>[27,30]</sup>。笔者观察发现,6 月末后的枸杞岛海域未见漂浮铜藻出现,但该时期的底拖网作业经常发现大量无气囊和叶片的沉底铜藻,7 月后沉底的铜藻也全部衰败消失,由此得出枸杞岛海域的漂浮铜藻一定来源于筏架定生和底栖铜藻通过有性繁殖产生的新补充群体。日本自 20 世纪 60 年代以来就有漂浮铜藻出现,其仅来源于底栖铜藻<sup>[31]</sup>,但所形成的漂浮铜藻规模远不及现今暴发的“金潮”。近年来底栖铜藻的数量显著下降<sup>[23]</sup>,筏架养殖设施的规模不断扩大,海水富营养化水平提高<sup>[32]</sup>,为筏架定生铜藻数量的增长提供了有利条件,也成为“金潮”暴发的又一潜在可能。枸杞岛筏架定生铜藻的初始株数约是底栖铜藻的 6 倍。由于筏架定生铜藻处在高光照条件下,生长速度显著高于底栖铜藻<sup>[33]</sup>,也为铜藻气囊快速长成后脱离附着基实现漂浮提供了必要条件。笔者调查发现 9 月初筏架定生铜藻有少量气囊出现,但受藻体气囊个体小或数量少所形成的浮力不足以支撑藻体漂浮,在相对静水状态下的藻体会自然下沉至海底,并逐渐衰败消亡;10 月末及后续月份铜藻的气囊数量逐渐丰盈能为藻体提供足够的浮力,当铜藻脱离附着基后可营漂浮于海面。陈亮然等<sup>[34]</sup>调查发现 9 月至翌年 1 月前枸杞岛的底栖铜藻每个主侧枝气囊数量不足 5 个,受净效温度增长影响翌年 3 月后铜藻的气囊数量明显增加。本研究中,翌年 3 月末底栖铜藻的气囊数量显著增多,但分布于潮间带上部的铜藻,由于植株低矮仍无气囊出现。因此,底栖铜藻脱离附着基后形成漂浮铜藻的时间约为翌年 3 月末或更晚。从漂浮铜藻形成时间分析,来源于筏架定生的漂浮铜藻形成时间比来源底栖的漂浮铜藻早 5~6 个月。受筏架定生和底栖铜藻气囊长成及浮力影响,铜藻脱离附着基后形成的漂浮铜藻在时间维度的组成上也存在一定差异。2017 年 4 月初

至 5 月末中国东海区附近有更大规模的漂浮铜藻斑块出现<sup>[8]</sup>。结合底栖铜藻脱离附着基后形成漂浮铜藻时间,以及筏架定生铜藻该阶段也具备形成漂浮铜藻的条件,认为 3 月末及后续月份形成的漂浮铜藻来源于筏架定生和底栖铜藻,并共同导致后续月份漂浮铜藻生物量增加;而 3 月末前形成的漂浮铜藻来源可能仅为筏架定生铜藻。由于枸杞岛筏架定生铜藻株高、最长初生分枝等的生长速率远大于底栖铜藻,在生长方面筏架定生铜藻会更为迅速<sup>[33]</sup>。因此,同一时期内筏架定生铜藻生物量普遍高于底栖铜藻。从筏架定生和底栖铜藻来源的漂浮铜藻生物量占比来看,枸杞岛近岸海域约 99.12%的漂浮铜藻生物量来源于筏架定生铜藻,底栖铜藻仅为 0.88%。

#### 3.2 枸杞岛近岸海域定生来源漂浮铜藻形成生物量

温度和光强是铜藻生长过程中的重要影响因素<sup>[33]</sup>。漂浮铜藻为适应海表生存环境,在面对高光强及其他环境因素影响下,具有更高的生长速率及高光强适应能力<sup>[19]</sup>。为评估定生来源漂浮铜藻的形成生物量,选择合适的铜藻 RGR 尤为关键。由于筏架定生和底栖铜藻相较于漂浮铜藻所处环境差异不同,导致定生铜藻的 RGR 已不再适用于漂浮铜藻生物量的评估。刘正一等<sup>[19]</sup>和王惠杰等<sup>[33]</sup>模拟铜藻漂浮 7 d 以及 30 d 的 RGR 分别为 8.25%/d、6.89%/d,可见不同模拟漂浮时间以及所处光强和温度差异影响,RGR 呈现出较大变化,将会直接影响漂浮铜藻生物量的评估。因此,为减小因模拟漂浮周期长短以及光强和温度变化的影响,本研究采用杨起帆等<sup>[27]</sup>在枸杞岛模拟漂浮铜藻共 85 d 的 RGR 为 4.68%/d,进行漂浮铜藻生物量估算。受不同地域、环境因子、漂浮周期等差异影响,漂浮铜藻生物量的评估存在一定的不确定性,RGR 的大小直接影响漂浮铜藻生物量。此外,铜藻漂浮周期的长短也是漂浮铜藻生物量形成的驱动因素。Yatsuya<sup>[35]</sup>发现来源于日本 1 月的底栖铜藻可漂浮 14 周,本研究根据铜藻气囊形成后能够支撑其漂浮的时间周期测算,筏架定生和底栖铜藻脱离附着基后至少可分别漂浮 24 周、8 周。漂浮周期越长经 RGR 测算出的漂浮铜

藻最终生物量会呈暴发式增长, 能为漂浮铜藻快速扩增提供有力支撑。因此, 漂浮铜藻的 RGR 以及漂浮周期是评估其形成生物量的关键因素。

Qi 等<sup>[36]</sup>通过遥感估算显示东海区漂浮的覆盖面积约 500000 km<sup>2</sup>, 2017 年 4 月漂浮铜藻生物量最大为 607600 t。通过枸杞岛筏架定生铜藻可形成铜藻漂浮生物量与东海区漂浮铜藻生物量对比, 并依据 RGR (4.68%/d) 和筏架定生来源(漂浮 173 d)、底栖来源(漂浮 57 d)铜藻的生长测算结果, 仅枸杞岛筏架定生来源的漂浮铜藻生物量就占东海区漂浮铜藻总量的 23.36%, 底栖铜藻占东海区漂浮铜藻总量的 0.21%。此外, 漂浮铜藻生物量的形成还与其断枝的再生能力有关, 杨起帆等<sup>[27]</sup>研究表明定生铜藻主枝断裂后可在漂浮状态下再生, 并能通过继续断裂和快速漂浮生长, 在短时间内聚集形成较大数量的漂浮铜藻生物量。有关整株漂浮铜藻与断裂成多个漂浮分枝生长速率更快的科学问题还需进一步研究并加以证实。

### 3.3 我国漂浮铜藻来源及漂浮路径浅析

定生铜藻生物量来源方面。黄冰心等<sup>[3]</sup>调查发现辽东半岛和山东沿岸都有底栖铜藻存在, 同样枸杞岛底栖铜藻也有一定的生物量。但受各种因素影响, 底栖铜藻分布面积正呈逐年衰退<sup>[37]</sup>, 似乎不足以支撑庞大的漂浮铜藻生物量。相较于底栖铜藻, 筏架定生铜藻规模随养殖设施面积增加也逐年增加, 例如山东仅荣成 2016 年海带筏式养殖区面积可达 40 km<sup>2</sup><sup>[38]</sup>, 同时以长江河口以南区域浙江为例, 舟山枸杞岛筏架贻贝养殖面积为 14.87 km<sup>2</sup>。可见当地养殖筏架设施为铜藻定生提供了良好的附着基, 并且筏架定生铜藻相较于底栖铜藻有更高的株高及生物量水平<sup>[38]</sup>, 生长速率也同样如此<sup>[33]</sup>。筏架定生铜藻脱离附着基后形成的漂浮铜藻生物量会远超底栖铜藻并占据主导。由此, 从定生铜藻生物量来源分析, 长江河口以北和以南的筏架定生铜藻能够为漂浮铜藻提供生物量来源。

漂浮铜藻出现时间上, 山东附近海域漂浮铜藻为 10—12 月<sup>[39]</sup>, Xing 等<sup>[10]</sup>利用高分(GF)的高分辨率卫星图像对海上漂浮铜藻的漂浮路径和起源

进行研究, 表明 2016 年 10 月至 2017 年 1 月山东荣成是南黄海漂浮铜藻的潜在来源; Yuan 等<sup>[40]</sup>调查发现 2019 年 10 月末山东半岛附近首次出现漂浮铜藻并向南漂移, 翌年 1 月初抵达江苏紫菜养殖区, 1 月末在东海区西北部消失。由此, 山东附近海域定生铜藻脱离附着基后形成漂浮铜藻时间约为 10—12 月甚至更晚。Zhang 等<sup>[8]</sup>利用卫星图像可观测到浙江沿岸有漂浮铜藻初始斑块, Komatsu 等<sup>[4]</sup>于 2007 年 3 月通过在浙江外海漂浮铜藻上放置定位浮漂并追踪, 发现漂浮铜藻在同年 5 月抵达大陆架边缘及受黑潮影响水域(包括南黄海)。本研究中, 铜藻气囊的形成时间及数量是支撑定生铜藻脱离附着基后形成漂浮的必要条件。枸杞岛铜藻最早形成漂浮铜藻时间为 10 月末, 在翌年 1—5 月或更晚枸杞岛漂浮铜藻呈规模出现, 并随暖流影响漂移至东海区和南黄海。因此, 辽东半岛和山东附近海域或浙江枸杞岛区域形成的漂浮铜藻存在两条不同的出现时间线。

受不同区域海流影响导致漂浮铜藻呈现出不同的漂浮路径。詹冬梅等<sup>[39]</sup>研究发现北黄海漂浮铜藻受冬季强黄海沿岸流影响可向南漂移, 在漂浮路径上呈现由北向南漂移趋势。由于 11 月至翌年 2 月强北季风影响, 黄海会形成非常强的向南沿岸流<sup>[3,41]</sup>, 导致该区域的漂浮铜藻呈向南漂移特征。但由于长江环锋有防止颗粒漂移的阻碍“墙”作用, 阻碍了长江河口以北区域的漂浮铜藻的漂浮路径<sup>[12,20]</sup>。因此, 长江环锋可能作为分割我国漂浮铜藻南北来源的分界线。相关研究表明, 浙江沿岸的漂浮铜藻受长江稀释水流影响呈现向东漂移特征<sup>[36]</sup>, 同时受黑潮暖流影响下被输送到东海及南黄海区域<sup>[4]</sup>, 漂浮路径上呈现由南向北移动特征。不同潮流导致了漂浮铜藻呈现出两种不同的漂浮路径来源, 北面来源的漂浮铜藻呈由北向南漂移趋势, 而南面来源的漂浮铜藻呈由南向北的趋势。目前漂浮铜藻引起的“金潮”现象日益频发, 在我国南黄海和东海等地均有报道。我国漂浮铜藻的来源大致可分为: (1)辽东半岛和山东附近海域<sup>[3,38]</sup>; (2)长江口以南浙江到福建甚至广东沿海<sup>[16,25,38]</sup>。此外, 在分析漂浮铜藻来源

时, 应结合不同区域定生铜藻生物量、形成漂浮铜藻时间、不同区域漂浮铜藻漂浮路径等进行综合考量。

#### 4 结论

枸杞岛近岸海域的漂浮铜藻来源于定生铜藻脱离附着基后产生, 且形成的漂浮铜藻生物量大部分来源于筏架定生铜藻; 筏架定生铜藻数量多、高 RGR 以及漂浮后的生存周期长等特性能为我国黄东海区“金潮”的暴发提供生物量基础; 结合我国不同区域定生铜藻生物量基础、漂浮铜藻出现时间、潮流及长江环锋影响铜藻漂浮路径等因素影响分析, 我国漂浮铜藻可能有两条路径来源: 北面来源为辽东半岛和山东附近海域, 南面为长江河口以南区域。

#### 参考文献:

- [1] Zeng C K, Lu B R. Flora algarum marinarum sinicarum, tomus III phaeophyta, No. II fuciales[M]. Beijing: Science Press, 2000: 43-44. [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.]
- [2] Zeng Y P, Ma J H, Chen B B, et al. Survey on the community of benthic macro-algae in Gouqi Island of Zhejiang Province[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25(5): 1096-1102. [曾宴平, 马家海, 陈斌斌, 等. 浙江省枸杞岛潮间带大型底栖海藻群落的研究[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(5): 1096-1102.]
- [3] 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. [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.]
- [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] Cai J C, Geng H X, Kong F Z, et al. Simulation study on the effect of *Sargassum horneri* on other harmful bloom causative species[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, 50(5): 1050-1058. [蔡佳宸, 耿慧霞, 孔凡洲, 等. 铜藻金潮对浒苔绿潮和几种赤潮原因种生长影响的模拟研究[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(5): 1050-1058.]
- [7] Yu R C, Liu D Y. Harmful algal blooms in the coastal waters of China: Current situation, long-term changes and prevention strategies[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10): 1167-1174. [于仁成, 刘东艳. 我国近海藻华灾害现状、演变趋势与应对策略[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1167-1174.]
- [8] Zhang J H, Ding X W, Zhuang M M, et al. An increase in new *Sargassum* (Phaeophyceae) blooms along the coast of the East China Sea and Yellow Sea[J]. Phycologia, 2019, 58(4): 374-381.
- [9] 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.
- [10] Xing Q G, Guo R H, Wu L L, et al. High-resolution satellite observations of a new hazard of golden tides caused by floating *Sargassum* in winter in the Yellow Sea[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(10): 1815-1819.
- [11] Chen J, Wang Y C, Yu Q R, et al. Molecular phylogenetic analysis of floating *Sargassum horneri* associated with green tides in coastal area of Qingdao[J]. Journal of Biology, 2016, 33(1): 39-42. [陈军, 王寅初, 余秋蓉, 等. 绿潮暴发期间我国青岛漂浮铜藻的分子鉴定[J]. 生物学杂志, 2016, 33(1): 39-42.]
- [12] 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.
- [13] Lyu F, Guo W, Ding G, et al. Analysis of the similarity of ITS and cox I sequences of *Sargassum horneri* along the offshore of China[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(6): 141-146. [吕芳, 郭文, 丁刚, 等. 中国近海铜藻 ITS 与 cox I 序列相似性分析[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(6): 141-146.]
- [14] Huang C H, Sun Z M, Gao D H, et al. Molecular analysis of *Sargassum* from the northern China seas[J]. Phytotaxa, 2017, 319(1): 71-83.
- [15] Byeon S Y, Oh H J, Kim S, et al. The origin and population genetic structure of the ‘golden tide’ seaweeds, *Sargassum horneri*, in Korean waters[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): Article No.7757.
- [16] Qi L, Cheng P, Wang M H, et al. Where does floating *Sargassum* in the East China Sea come from?[J]. Harmful Algae, 2023, 129(9): 102523.
- [17] Chen Y L, Wan J H, Zhang J, et al. Spatial-temporal

- distribution of golden tide based on high-resolution satellite remote sensing in the south Yellow Sea[J]. Journal of Coastal Research, 2019, 90(sp1): 221-227.
- [18] Zhu Q, Ren J R, Chen J J, et al. The morphological and ultrastructural profiling between floating and benthic *Sargassum horneri*[J]. Journal of Biology, 2019, 36(3): 51-54. [朱旗, 任继锐, 陈娟娟, 等. 定生型和漂浮型铜藻的形态及超微结构观察[J]. 生物学杂志, 2019, 36(3): 51-54.]
- [19] 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]. 生态学报, 2021, 40(1): 76-83.]
- [20] Wu Z L, Chen L R, Wang K, et al. Morphological characteristics of vesicle of *Sargassum horneri* and its relationship to environmental factors in Gouqi Island[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(5): 793-804. [吴祖立, 陈亮然, 王凯, 等. 枸杞岛铜藻气囊形态特征及其与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2020, 44(5): 793-804.]
- [21] Zhang Y L, Zhou H S, Li C, et al. Community structure of large benthic algae in water area of Gouqi Island of Zhejiang Province[J]. Hebei Fisheries, 2018(5): 33-36. [张云岭, 周海生, 李春, 等. 浙江省枸杞岛大型底栖海藻群落结构研究[J]. 河北渔业, 2018(5): 33-36.]
- [22] Zhang S Y, Liu S R, Zhou X J, et al. Ecological function of seaweed-formed habitat and discussion of its application to sea ranching[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 2004-2014. [章守宇, 刘书荣, 周曦杰, 等. 大型海藻生境的生态功能及其在海洋牧场应用中的探讨[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 2004-2014.]
- [23] 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.]
- [24] Zhang S Y, Wang L, Wang W D. Algal communities at Gouqi Island in the Zhoushan archipelago, China[J]. Journal of Applied Phycology, 2008, 20(5): 853-861.
- [25] 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.]
- [26] 央视网. “蓝色牧场”产出“大经济” “养殖+加工+海岛游”激活经济新活力[EB/OL]. (2024-06-26)[2024-06-30]. <https://news.cctv.com/2024/06/26/ARTI1MF4AX9OY6FSUdd8YQCM240626.shtml>.
- [27] Yang Q F, Wang H J, Zhu W D, et al. Regenerative capacity of *Sargassum horneri* in the waters of Gouqi Island, Zhejiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9274-9284. [杨起帆, 王惠杰, 朱伟栋, 等. 浙江枸杞岛海域铜藻的再生能力[J]. 生态学报, 2024, 44(20): 9274-9284.]
- [28] Liu T. Experimental techniques for large-scale seaweed[M]. Beijing: Ocean Press, 2016: 105-106. [刘涛. 大型海藻实验技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2016: 105-106.]
- [29] 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]. 生态学报, 2013, 32(5): 1255-1259.]
- [30] Yang Q F, Wang H J, Zhu W D, et al. Ecological study on the decay and replenishment of *Sargassum horneri* in the intertidal zone of Gouqi Island[J]. Ocean Development and Management, 2024, 41(4): 114-123. [杨起帆, 王惠杰, 朱伟栋, 等. 枸杞岛潮间带铜藻衰败及补充过程的生态学研究[J]. 海洋开发与管理, 2024, 41(4): 114-123.]
- [31] Yoshida T. Studies on the distribution and drift of the floating seaweeds[J]. Bulletin of Tohoku Regional Fisheries Research Laboratory, 1963, 23(1): 141-186.
- [32] Li J J, Liu Z Y, Zhong Z H, et al. Limited genetic connectivity among *Sargassum horneri* (Phaeophyceae) populations in the Chinese marginal seas despite their high dispersal capacity[J]. Journal of Phycology, 2020, 56(4): 994-1005.
- [33] Wang H J, Yang Q F, Zhu W D, et al. Comparative growth analysis of intertidal zone and raft *Sargassum horneri* in Gouqi Island[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(11): 1364-1373. [王惠杰, 杨起帆, 朱伟栋, 等. 枸杞岛潮间带和筏架定生铜藻生长差异[J]. 中国水产科学, 2023, 30(11): 1364-1373.]
- [34] 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. [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.]
- [35] Yatsuya K. Floating period of Sargassacean thalli estimated by the change in density[J]. Journal of Applied Phycology, 2008, 20(5): 797-800.
- [36] Qi L, Hu C M, Barnes B B, et al. Climate and anthropogenic controls of seaweed expansions in the East China Sea and Yellow Sea[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(19): e2022GL098185.

- [37] 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.
- [38] Zhuang M M. Molecular biology based traceability study of *Sargassum horneri* golden tides in the nearshore of China[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022. [庄旻敏. 我国近岸海域铜藻金潮生物学溯源研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.]
- [39] Zhan D M, Liu W, Xin M L, et al. A preliminary study on origin of drifting *Sargassum horneri* in North Yellow Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, 44(4): 123-127. [詹冬梅, 刘玮, 辛美丽, 等. 北黄海漂浮铜藻来源的初步探讨[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(4): 123-127.]
- [40] Yuan C, Xiao J, Zhang X L, et al. Two drifting paths of *Sargassum* bloom in the Yellow Sea and East China Sea during 2019-2020[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2022, 41(6): 78-87.
- [41] Zhong F C, Xiang R, Yang Y P, et al. Evolution of the Southern Yellow Sea Cold Water Mass during the last 7 kyr from benthic foraminiferal evidence[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2018, 48(10): 1377-1390. [钟福昌, 向荣, 杨艺萍, 等. 近 7ka 来南黄海中部冷水团演化的底栖有孔虫记录[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(10): 1377-1390.]

## Study on occurrence floating *Sargassum horneri* and their sources in the coastal waters of Gouqi Island

ZHU Weidong<sup>1</sup>, YANG Qifan<sup>1</sup>, WANG Huijie<sup>1</sup>, MIAO Hang<sup>1</sup>, LIU Fengyu<sup>1</sup>, Qin Pengjie<sup>1</sup>, BI Yuanxin<sup>1,2</sup>

1. Institute of Oceans and Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China

2. Institute of Marine Fisheries of Zhejiang Province, Key Laboratory of Mariculture and Enhancement of Zhejiang Province, Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for Fishery Resource of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China

**Abstract:** In order to investigate the occurrence and sources of floating *Sargassum horneri* in the coastal waters of Gouqi Island. This study used the raft attachment and benthic *S. horneri* in Gouqi Island as the research object. Based on the growth, vesicle formation time, and biomass change rules of the attached *S. horneri*, the occurrence time, biomass, and floating path of the *S. horneri* were analyzed from the source. The findings indicate the following: (1) The formation time of floating *S. horneri* from raft attachment is 5–6 months earlier than that from benthic sources, and that approximately 99.12% of the biomass of floating *S. horneri* in the coastal waters of Gouqi Island likely originates from raft-attached *S. horneri*, whereas only 0.88% of the biomass originates from benthic *S. horneri*. (2) The number of floating *S. horneri* strains formed after the raft-attached *S. horneri* detached from the attachment base was approximately  $22 \times 10^6$ , with a biomass of about 141938 t. The biomass of floating *S. horneri* solely from raft attachment on Gouqi Island accounts for 23.36% of the total biomass of floating *S. horneri* in the East China Sea, whereas the benthic *S. horneri* comprises 0.21%. (3) Based on the biomass of attached *S. horneri* in various regions of China, the timing of floating *S. horneri* occurrences, tidal currents, and the influence of the Yangtze River environment on the floating pathways of *S. horneri*, two potential sources of floating *S. horneri* in China were identified. The northern source is located near the Liaodong Peninsula and Shandong, whereas the southern source is situated south of the Yangtze River estuary. These findings not only provide a reference for analyzing the sources and occurrence potential of floating *S. horneri* in the coastal waters of Gouqi Island but also offer some basis for tracing the origins of the “Golden Tide”.

**Key words:** floating *Sargassum horneri*; vesicle; relative growth rate; floating path; Huangdonghai District; gold tide

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