

群落演替:小型海洋生态系统的建立及启示*

代乔坤, 华洪, 任津杰, 崔再航, 骆劲舟, 潘晓强

早期生命与环境陕西省重点实验室 / 大陆动力学国家重点实验室 / 西北大学地质学系,
陕西 西安 710069

摘要: 西北大学早期生命实验室于2019年5月中旬购置了一台体积为45 cm × 40 cm × 40 cm的小型海缸, 利用人工配比的海水养殖3株现生珊瑚用于观察研究。海缸自5月中旬至11月中旬间共经历“养活石养水(藻类大繁盛)”“加入新生物”与“海缸稳定化”共3个大阶段。发现群落的演替有一定的生态位取代规律, 在珊瑚生长与海缸环境演化的过程里出现了许多物种, 对放入的珊瑚及大量新出现的物种进行观察与记录, 并总结出蕨藻类与管虫的生长阶段模式。对于此海缸的记录可重演小型海洋稳定生态系统的形成过程, 为海洋生物观察实验与海缸养殖者提供一定的借鉴意义, 也可以为古生态学提供重要的参考。

关键词: 海缸; 群落演替; 珊瑚; 管虫; 蕨藻类

中图分类号: P52 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2021)05-0111-08

The succession of biological communities: Establishment of a small marine ecosystem and its enlightenments

DAI Qiaokun, HUA Hong, REN Jinjie, CUI Zaihang, LUO Jinzhou, PAN Xiaoqiang

*Shaanxi Key Laboratory of Early Life and Environments / State Key Laboratory of Continental Dynamics /
Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China*

Abstract: A small sea tank with a volume of 45 cm × 40 cm × 40 cm was set up to simulate the establishment of a simple marine ecosystem in mid-May, 2019. Three living corals were added and cultured in tank with artificial ratio water for observation and research. From the middle of May to the middle of November, this sea tank has gone through three stages: “appropriate environment establishment and bloom of algae” “adding of new organisms and colonization” and “the stabilization of seawater tank”. It was found that the succession of community followed a certain niche substitution rule. Many species have appeared in the process of coral growth and marine environment evolution, and the growth stage patterns of *Caulerpa* and tubeworms have been summarized in corresponding to the colonization of the corals and a large number of other new species. The record of this tank can reconstruct the formation process of a small stable marine ecosystem, which not only provides some references for the observation experiment of sea tanks and culturists, but also for palaeoecology.

Key words: seawater tank; community succession; coral; tube worms; *Caulerpa*

* 收稿日期: 2020-06-30

录用日期: 2020-10-28

网络首发日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(41672025, 41621003, 41890844); 中国科学院先导专项项目(XDB26000000);
国家重点研发项目(2017YFC0603101)

作者简介: 代乔坤(1996年生), 男; 研究方向: 早期生命演化、前寒武纪生物群; E-mail: daiqiaokun@163.com

通信作者: 华洪(1966年生), 男; 研究方向: 前寒武纪古生物地层学; E-mail: huahong@nwu.edu.cn

1 海缸环境

为了便于观察海洋现生生物, 在室内建立人造海缸是有必要的, 这有助于细致入微的研究和随时取样^[1-7]。

最初阶段, 海缸的环境十分重要, 首先应使环境进入良好状态, 要确保新加入缸中的水不包含氯和重金属, 因为这可能影响珊瑚虫的生长并且使得某些不必要的藻类大量繁殖。本缸采用桶装纯净水 (18.9 L), 共需水约 66.9 L, 海盐配比与海缸水体积 1 kg:30 L, 并且每两个星期更换总水量的 10%~15%, 同时在混合化学盐前后测定水体盐分并保证人造海水比重为 1.022~1.024, 相应的盐度为 2.9%~3.1%。缸内水体盐度应当保持稳定, 不可随意改变, 以免引起缸内生物死亡。每间隔一段时间用 pH 试纸和水中亚硝酸盐速测管对海缸内水体的酸碱度、亚硝酸盐等进行检测, pH 范围稳定在 8.2~8.4, 亚硝酸盐值稳定在 0.02~0.05 之间。当亚硝酸盐值过高时需要加入一定量的亚硝酸盐细菌以分解。

在将生物放入之前都须等到海缸内的氮化合物循环结束, 添加硝化细菌对加速氮化合物循环有积极的作用, 添加活石与沙砾亦能减少 NO_3^- 可加快完成此过程, 并利于形成厌氧菌。所谓活石, 其表面原本附有不同菌群和大量微生物, 但在经过长期脱水与长途运输后大部分均已减活或死亡, 且含有大量的毒素营养盐, 需要经过爆藻 (通过藻类的大量繁殖来消耗亚硝酸盐类) 和养水除去。一个完整氮化合物循环的形成可能会需要 2~6 个月的时间才能完成。海缸中的生物碎屑与食物残渣会被分解为铵盐, 从而危害珊瑚。安装蛋白质分离器分解这些未被转化的有机物, 从而净化水体。但是蛋白质分离器只能去除约 40%~50% 的废物, 剩余的需要硝化细菌、厌氧菌等来消除。最初的 2~3 个月后, 活石上会生长出颜色不同的基础藻类, 常见为绿色丝状或褐红色席状点状贴附分布, 倘若活石非常干净, 藻类很少, 说明海缸水体仍需加强循环直至氮化合物循环结束, 以形成无害的环境。

照明有助有益藻类生长, 它们会消耗大量的硝酸盐, 照射时长不少于 6~8 h/d。藻类大量繁殖时, 会出现一些不利于微环境的藻类, 此时加入食藻螺类可以解决。电器 (如卤素灯、制浪机等) 的不间断使用会产生大量热力, 导致海缸水体温度上升, 同时需要安装水冷机与恒温棒以助于夏、

冬两季的温度控制, 保证海缸水体温度稳定在 24~26 °C。

2 海缸生物群落演替的三大阶段

2.1 养活石养水, 藻类大繁盛阶段 (5月中旬~7月中旬)

活石即海底的珊瑚礁石, 是自然死亡的珊瑚骨架和泥沙混合而成的, 整体部分已经干燥, 表面裂隙和骨腔孔洞内具有处在休眠状态的微生物。以人工配比的海水对活石进行清洗去除死亡的生物体和表面附着物后, 于缸底堆置造景并保持水流通畅不构成死角, 再铺上一层白色砂砾 (图 1)^[8]。这样也称之为“海缸柏林系统”^[9], 即利用活石自带菌种和微缝、裂隙以及水体来培育硝化细菌和厌氧细菌, 维持系统内部稳定。之后, 添加硝化细菌进行爆藻, 细菌溶液与海缸水体积比例关系为每 100 L 水体添加 10 mL 细菌溶液 (10 mL 硝化细菌溶液中细菌密度为 8×10^{10} cfu/mL), 同时将所有设备打开, 光照约 12 h/d。



图 1 海缸养殖初期步骤^[8]

Fig. 1 Initial steps of seawater tank cultivation^[8]

(1) 1~10 d, 会出现大量先锋藻类——褐藻, 毯状分布于活石上 (图 1:4)。

(2) 10~20 d, 缸壁、石缝等可附着的地方, 出现绿藻发状丝体 (图 1:5), 可达 3~5 cm, 并快速生长扩张至整个海缸。

(3) 20~30 d, 绿藻数量巨大, 满缸可附着之处均有, 丝状藻体长且扭曲, 可达 9~10 cm, 此时

缸内光合作用达到鼎盛。同时,产生属扁形动物门 Platyhelminthes 涡虫纲 Turbellaria 的涡虫 (turbellarian) (图2A) 及食藻螺 (图2B) 等动物。新出现一种食藻动物 (图2D、E), 其通体呈白色, 长约6 mm, 会在缸壁上自由移动或游动, 其身体在吞食海藻后未发生变色, 故排除海蜗牛^[10-11], 应该为扁虫 (platyhelminth)。头部呈球状, 有口, 张合吸食藻类, 尾部燕裂状, 在取样制作薄片时, 自身会分解破裂。

(4) 30~45 d, 大量绿藻顶部出现白化, 此时需要进行刷缸清洁处理, 去除所有藻类, 并换入1/3~1/2的新水, 同时重新测量缸内盐度、温度等数据以保持稳定。此时, 缸内零星出现鬼手海葵 *Aiptasia* (目前未准确定种) 幼体^[12-16] (图2C), 该种海葵对珊瑚有害, 适应力极强, 需及时清除。

(5) 50~60 d, 调整钙镁比指标, 监测盐度, 并调整 NO_3^- 与 PO_4^{3-} 的值为0, 为下一阶段入住生物做好准备。

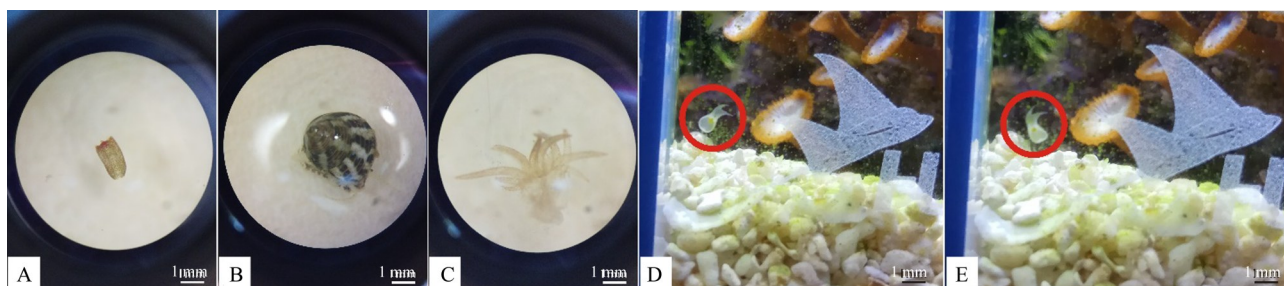


图2 海缸第一阶段生物

A: 涡虫; B: 食藻螺; C: 鬼手海葵; D、E: 扁虫。

Fig. 2 The first stage creatures in sea tank

A: turbellarian; B: algae-eating snail; C: *Aiptasia*; D、E: platyhelminth.

2.2 新生物加入与定殖阶段(7月中旬~9月中旬)

继上一阶段后, 监测水质并平衡各项物化指标值后放入第一批生物, 待稳定且营养盐不发生明显升高后可继续放入。在水族海产市场购买3种软体珊瑚, 其中2种为纽扣珊瑚, 1种为草皮珊瑚。2种纽扣珊瑚分别为A型和B型: A型属于鞘群海葵属 *Epizoanthus* (图3A), B型属花群海葵属 *Zoanthus* (图3B); 草皮珊瑚属笙珊瑚属 *Tubipora* (图3C)。将珊瑚连外包装袋放入海缸使其浮于水体表面, 待温度统一后再向袋内缓慢添加海缸水体, 最后下放到海缸之中。除此外未加入任何现生生物活体, 且3株珊瑚的位置也未曾移动。此时, 由于珊瑚的加入, 水缸内食物来源不足, 需要加入珊瑚成长粮。成长粮分为素食与肉食2种——素食为含小球藻、新月菱形藻、角毛藻、微球藻、微绿球藻等浮游藻类的混合液 (所加藻类植物平均颗粒直径2~18 μm , 最终密度为 5×10^8 cfu/mL), 肉食为含丰年虾幼体、糠虾、桡足类、枝角类等浮游动物卵的混合液 (所加藻类植物平均颗粒直径800 μm , 最终密度为 1×10^6 cfu/mL)。具体的2种营养液配比方法如下 (参考人造海水配比): 每1 L 人造海水 (盐度约3.0%), 含有氯化钠 (NaCl) 2.260 g, 硫酸镁 (MgSO_4) 3.248 g, 氯化钙 (CaCl_2) 1.153 g, 碳酸氢钠 (NaHCO_3) 0.198 g, 氯化钾 (KCl)

0.721 g, 溴化钠 (NaBr) 0.058 g, 硼酸 (H_3BO_3) 0.058 g, 硅酸钠 (Na_2SiO_3) 0.0024 g, 偏硅酸钠 ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) 0.0015 g, 磷酸 (H_3PO_4) 0.002 g, 六氯化二铝 (Al_2Cl_6) 0.013 g, 氨 (NH_3) 0.002 g, 硝酸锂 (LiNO_3) 0.0013 g。配好后, 分别将上述的2种珊瑚成长粮的素食与肉食原液按1:1与人造海水混合得到两种营养液。2种食物营养液与海缸水体积均为190 L: 5~10 mL, 此阶段的光照约8~9 h/d, 以防藻类大量繁盛影响珊瑚发育。

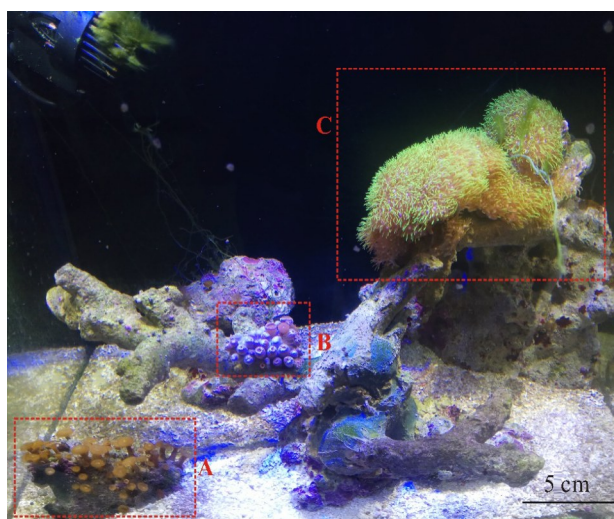


图3 海缸整体面貌

Fig. 3 Overall appearance of seawater tank

A型: 呈暗绿色多幅星射对称, 外围褐色有触手, 触手在盘缘一上一下环布, 约50~60个。

B型: 通体紫红色, 多幅星射对称, 外部有短柱状触手, 均分布在盘缘上侧, 约40个, 最外层还有一保护层。

草皮: 星花珊瑚的一种, 每个水螅体均具有8条触须且中心都有1个白点, 由数个个体丛生依附于活石上, 可通过人为切割根部繁殖。

在此阶段出现2种新型藻类, 经对比, 可确定两类均属蕨藻类, 同样分为固着器、匍匐茎和直立枝3部分, 其一为针叶蕨藻 *Caulerpa sertularioides*^[17] (图4A-a), 鲜绿色, 固着器为须状假根, 生于匍匐茎背光侧; 分枝具有羽状的直立枝, 可高达10 cm以上, 羽状叶片为圆柱形。另一为长茎葡萄蕨藻 *Caulerpa lentillifera*^[18] (图4A-b), 鲜绿色, 固着器为须状假根, 生于匍匐茎背光侧; 匍匐茎上分生出多个直立枝; 直立枝上分生具柄实心囊球, 柄上的囊球对称生长形成葡萄状的直立枝。石莼 *Ulva*^[19] (图4C) 出现, 藻体匍匐, 多细胞片状叶状体, 膜质, 呈扭曲的扁管带状固着于活石上生长, 低级藻类的数量大大下降。大量钙藻 *Coralline* (图4D) 出现, 颜色多样。常见褐色、紫红色, 壳状覆于活石上。

2.3 海缸生物群落稳定化阶段(9月中旬~11月中旬)

在经过几个月的繁衍生息后, 草皮珊瑚的规

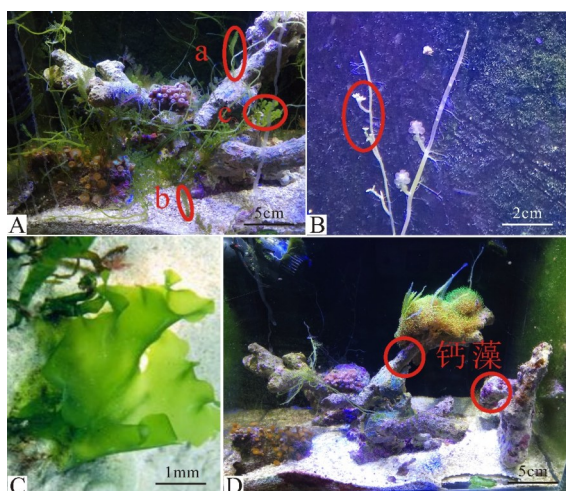


图4 海缸第二阶段生物

A: 针叶蕨藻(a), 长茎葡萄蕨藻(b), 新型藻类1(c);

B: 新型藻类2; C: 石莼; D: 钙藻。

Fig. 4 The second stage creatures in sea tank

A: *Caulerpa sertularioides* (a), *Caulerpa lentillifera* (b), new algae 1(c); B: new algae 2; C: *Ulva*; D: calcareous algae.

模扩大了1倍之多, 另外2种纽扣珊瑚未发生太大的扩张, 甚至A型中有几株虫体出现白化现象, 但单个个体明显增大, 同时也发现其存在从母体底部侧方无性出芽生殖(侧部, 未发现轴部出芽)、产生“兔头状”水螅幼体等现象(图5A); A型在离其原母簇20 cm处产生了1株新的单体并健康生长。B型未发生太大变化, 产生了一些新个体并且每株个体也稍稍增大, 未见其出现水螅体或新的单体或出芽生殖等现象, 但出现与海葵共生现象, 海葵直接生长在珊瑚簇丛内部(图5B)。

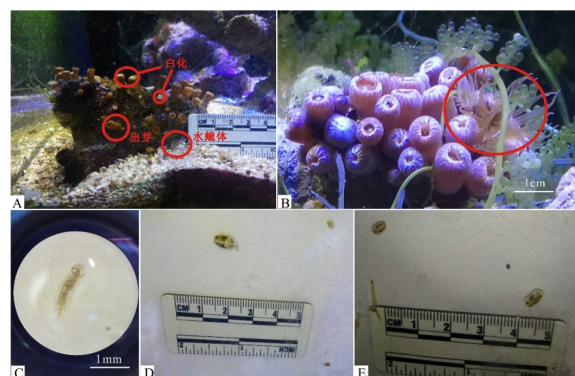


图5 海缸第三阶段生物

Fig. 5 The third stage creatures in sea tank

A: A型珊瑚(白化现象、底部侧方出芽生殖及水螅型幼体);

B: B型珊瑚与海葵共生; C: 虾幼体; D、E: 石鳖。

A: type-A coral(albinism, bottom side budding and hydra larvae); B: type-B coral coexisting with *Aiptasia*;

C: shrimp larvae; D、E: soft-shelled turtle.

每簇珊瑚的生长状态不同, 可能与在海缸中的高低放置相关, 而这与缸内水循环紧密联系, 珊瑚营滤食, 水流流速快, 所携营养物质循环越强。A型珊瑚处在海缸最底层, 水流循环差, 生长状态很差, 这也许是其尽力繁殖的一个可能, 从而使母簇更加色褪, 毫无生机; 而B型珊瑚位置较高, 距离人造光源稍近, 却也仅仅只是保持现状; 草皮珊瑚的生长状态最好, 其距光源最近, 侧面迎造浪机, 水流不断带来丰富的营养物质, “造礁”与生态扩张最迅速。

此阶段出现2种新型藻类^[20-23](图4A-c、图4B), 同样分为固着器、匍匐茎和直立枝3部分, 经对比, 可确定为蕨藻类, 与葡萄藻类似, 但顶部特征不同, 其叶片均稍偏大。新种1应为总状蕨藻 *Caulerpa racemosa*, 藻体鲜绿色, 具横隔片, 固着器为须状假根, 生于匍匐茎背光侧; 匍匐茎上分生出多个直立枝; 枝上分生出具柄实心囊球;

管状柄可达4~8 mm。新种2应为总状蕨藻管状变种 *Caulerpa racemose* var., 鲜绿色, 亦具横隔片, 固着器为须状假根, 生于匍匐茎背光侧; 匍匐茎上分生出多个直立枝; 枝上分生出具柄掌状囊。株体的叶片呈奇异状, 形似手指, 叶互生或对生^[24]。海葵, 属六放珊瑚亚纲, 这种低级刺胞动物在稳定的环境中大量繁殖, 目前已产生较大的单体株20多株, 仍有新生的单体海葵不断出现并附着在缸壁之上(图6A)。同时, 也出现了可能为虾幼体(图5C)、扁跳虾(图7D)等甲壳类动物, 这可能是由于肉食珊瑚粮的补充所致。扁跳虾 *Platorchestia platensis* 属节肢动物门甲壳动物亚门软甲纲端足目, 其并非虾类(虾为十足目), 游动时呈弹跳状。

石鳖(soft-shelled turtle)^[25-26](图5D、E)出现。石鳖为多板纲 Polyplacophora 贝类, 整体为扁平卵圆形, 且两侧对称。外壳是八块壳板叠瓦状排列构成, 周有环带状外套膜。常吸附在活石表面或缸壁静止不动。

管虫(tube worm)^[27-30](图6B、C)出现且缓慢增多。管虫属环节动物门 Annelida 多毛纲 Polychaeta, 与龙介虫差异大, 触手部位明显不同^[28]。此种与常见的大型管虫不同, 该种管体极小。其管体为胶革质, 触摸时质地较软有韧性, 轻微按压后可复原, 整体呈中空, 单层。扫描电镜显示其体表有许多环状脊纹饰, 纵向有短脊在环脊之间, 整体并非套合结构, 至其上部纹理变弱, 外部常有藻类席状附着加厚。

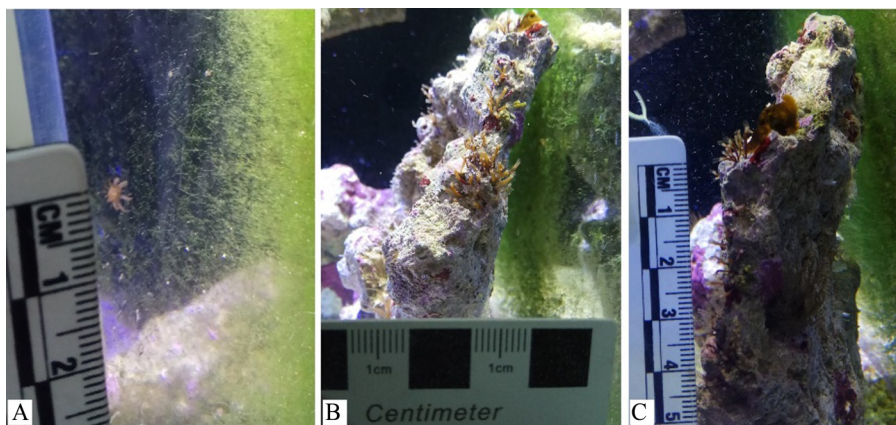


图6 单体海葵与管虫

A:单体海葵; B、C:管虫。

Fig. 6 Monomer *Aiptasia* and tube worm

A: monomer *Aiptasia*; B、C: tube worm.

3 讨论

海缸从最初发育至此阶段, 出现了较明显的生物分级、分层现象。藻类因其根部需要攀爬附着, 故占据了大量的底部空间与侧面缸壁(距底部15 cm以内)。管虫仅在下部活石上迎水流向分布(距底部10~20 cm, 其他区域未发现), 绿毛藻则广布在缸内可附着之处(主要在表面光滑的缸壁上, 距底部10~20 cm)。珊瑚的长势与水流、光照、位置的联系密不可分。

对于蕨藻类与管虫的观察提出两者的发育过程如下。

3.1 蕨藻类生长过程

蕨藻类生长大致分为4个阶段^[20-23], 如图8所示。

羽毛藻、葡萄藻以及海缸稳定阶段出现的2种藻的生长发育方式大致相同。

1) 配子囊结合并附着在基底上, 首先出现细小白色絮状幼体, 丝状。

2) 匍匐茎缓慢生长成为绿色长管状, 接着在其顶面会出现小型出芽, 同一时期茎腹面也会出现出芽, 但不同于顶面, 腹面芽更加纤细具有很多的绒毛(假根)便于抓爬活石和向上生长。

3) 顶面直立枝会分化为不同的叶——羽状、球状、圆顶状或掌状, 呈透明-淡绿色。

4) 随着叶绿体的补充整体转为深绿, 叶特征更加明显, 假根系更加发达(葡萄藻偶尔会出现茎体与直立枝均呈红色的藻体), 此阶段羽毛藻的叶可达50多对, 葡萄藻的球状叶多达100个以上。

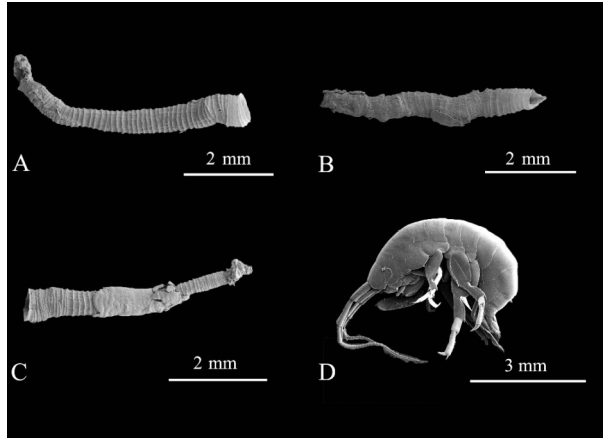


图7 管虫及扁跳虾扫描电镜照片

A~C: 管虫, A上可见小型孔洞, 可能为逃逸迹或捕食迹, B、C可见管外形成明显加厚的部分, 实为钙藻附着; D: 扁跳虾。

Fig. 7 Scanning electron microscope photos of tubeworm and flat jumping shrimp

A~C: tube worm, A has a small hole, which may be escape tracks or predation tracks, B, C have obvious thickened parts outside the tubes, which are actually calcareous algae attachment, D: flat jumping shrimp.

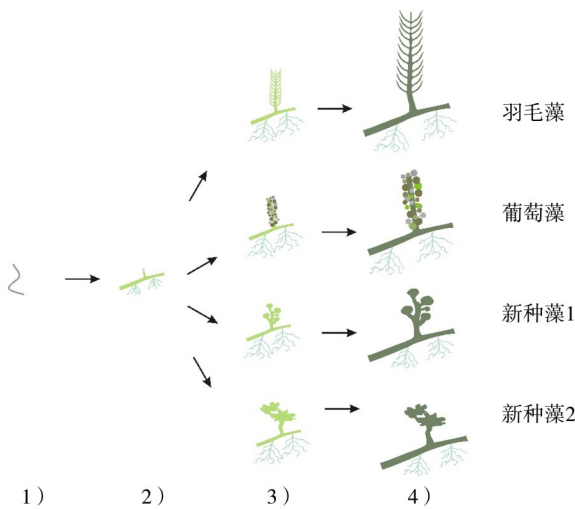


图8 蕨藻类生长阶段

Fig. 8 Growth stages of *Caulerpa*

繁殖期时, 藻体表面会形成乳突状配子囊, 同样可以通过匍匐茎的断裂进行营养繁殖。

根据多核细胞体蕨藻类同种生长的不同阶段和不同种类的出现顺序可以大致判断出海缸的演化进程, 如长茎葡萄蕨藻与针叶蕨藻的出现和成熟代表初级生产者的大量出现, 海缸环境趋于稳定, 而总状蕨藻、总状蕨藻管状变种的出现和成熟, 显示出小型生态系统已达到成熟阶段。当然, 不同的水体温度 (25~27 °C)、盐度 (1.021%~1.024%)、pH (8.1~8.4) 都会影响蕨藻类的出现

和生长速度。

3.2 管虫生长过程

管虫的生长大致分为3个阶段^[27-29], 如图9所示。

1) 此阶段呈微小水螅体, 白色, 丝状, 十分细小。

2) 随着水螅体的附着和增长, 管虫外表渐渐出现包裹状透明管体, 当钙质不断累积, 其质地逐渐变硬, 色泽暗黄, 此时管虫虫体长度达到1~4 mm, 但其膜质外壳具有一定的韧性, 轻微按压后可恢复原状。在其触手与暗黄色管体间有一小段呈半透明色的喇叭圆环, 圆环同为管体的一部分, 而非在管体表面或内部, 环最上部为触手, 负责滤食, 环状触手长1~1.5 mm, 约16~24个。

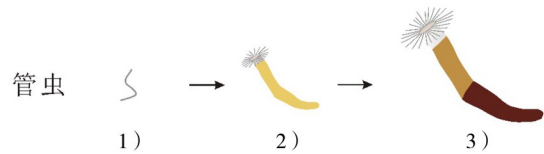


图9 管虫生长阶段

Fig. 9 Growth stages of tube worm

3) 继续增长, 此阶段管虫下部至中部区域颜色变得鲜艳, 有加厚现象, 呈暗紫红色, 与上部暗黄色管体(同2阶段中下部)明显不同, 实则为藻类的附着(图7B~C), 其管体本身并无厚度变化。此时, 管虫虫体长度达到7~9 mm, 环状触手长2~2.5 mm, 两横向纹饰间距0.14 mm。

这种胶革质管壁管虫的出现和缓慢增多显示出小型生态系统已达到稳定化的后期阶段, 整体生态系统已基本定型, 低、中、高等的生物均已出现并存在, 且显现出一定的垂直分度性。4种蕨藻类占据了大量的底部空间与可攀爬活石(距底部15 cm以内)。管虫固着于中下部活石表面(距底部10~20 cm), 绿毛藻主要布于侧面缸壁(20~35 cm)。同样, 不同的水体温度(26~28 °C)、盐度(1.022%~1.025%)、pH(8.1~8.4)也会影响软管虫的生长状况。

海缸虽小, 其中诸多生物都具有研究价值, 在海缸不同阶段的出现顺序以及小型生态系统与动物、藻类间的整体演化是一个不断前进的协同进程。

4 结论

1) 通过海缸养殖, 发现群落的演替有一定的

规律性,新出现的生物会逐渐取代现有的低等生物的生态位。

2) 珊瑚的成长状态、扩张速度与所放置的位置、光照、水流等因素相关。

3) 蕨藻类与管虫具有明显的阶段性生长模式,这样的阶段性可用于辅助判断海缸的演化

阶段。

4) 海缸的生态群落演替可以重演小型海洋稳定生态系统的形成,为海洋生物观察实验与海缸养殖者提供一定的借鉴意义,也可以为古生态学提供重要的参考。

参考文献:

- [1] 卡尔波维奇 A Ф. 水生生物移植驯化理论与实践 [M]. 北京:科学出版社,1986.
- [2] 姚泊,易祖盛,叶成仁,等. 人工海水调配及闭合循环饲养系统配置的研究 [J]. 中山大学学报论丛, 1997(1):100-103.
YAO B, YI Z S, YE C R, et al. The blending of artificial sea water and the installation of closed circulation system for raising with artificial sea water [J]. Sun Yat-sen University Forum, 1997(1):100-103.
- [3] 易祖盛,姚泊,叶成仁,等. 人工海水循环系统饲养珊瑚和海葵的初步研究 [J]. 中山大学学报论丛, 1997(1):104-107.
YI Z S, YAO B, YE C R, et al. Preliminary study on breeding of corals and sea-anemone in man-made sea-water circulate filter system [J]. Sun Yat-sen University Forum, 1997(1):104-107.
- [4] 廖庆强. 珊瑚、海葵在水族箱中的饲养探索 [J]. 科学养鱼, 2003(4):58.
LIAO Q Q. Exploration of feeding coral and anemone in aquarium [J]. Scientific Fish Farming, 2003(4):58.
- [5] 郭荣群. 闭合循环系统和人工海水解决赤潮危害的方案 [J]. 科学养鱼, 2012(1):52.
GUO R Q. Scheme of closed circulation system and artificial seawater to solve red tide hazards [J]. Scientific Fish Farming, 2012(1):52.
- [6] 依晨. 约会小海缸 [J]. 水族世界, 2014(1): 122-127.
YI C. Dating little artificial sea tank [J]. Aquarium, 2014(1):122-127.
- [7] RASMUSSEN B B, NGUYEN Q T, KRISTENSEN K, et al. What controls volatility of sea spray aerosol? Results from laboratory studies using artificial and real sea-water samples [J]. Journal of Aerosol Science, 2017, 107(Complete):134-141.
- [8] 海缸两种开缸方式的比较 [EB/OL]. (2019-04-11) <https://www.petzd.com/youhui/862>.
- [9] 海水缸柏林系统全解 [EB/OL]. (2013-12-23) <http://haishui.longdian.com/zhuanti/hsblxt.html>.
- [10] RUMPHOA M E, POCHAREDDYA S, WORFULA J M, et al. Molecular characterization of the calvin cycle enzyme phosphoribulokinase in the stramenopile Alga *Vaucheria litorea* and the plastid hosting Mollusc *Elysia chlorotica* [J]. Molecular Plant, 2009, 2(6):1384-1396.
- [11] 美国:科研人员发现一种能变成“植物”的蜗牛 [J]. 中国畜禽种业, 2008(23):94.
USA: Researchers found a snail that can become a "plant" [J]. The Chinese Livestock and Poultry Breeding, 2008(23):94.
- [12] ELLIOTT J K, MARISCAL R N. Ontogenetic and interspecific variation in the protection of anemone fishes from sea anemones [J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 1997, 208(1/2):57-72.
- [13] GUSMÃO L C, van DEUSEN V, DALY M, et al. Origin and evolution of the symbiosis between sea anemones (Cnidaria, Anthozoa, Actiniaria) and hermit crabs, with additional notes on anemone-gastropod associations [J]. Molecular Phylogenetics and Evolution, 2020, 148:106805.
- [14] 史文军,秦松,张朝晖,等. 海葵化学成分及生物活性研究进展 [J]. 海洋科学, 2013, 37(1):122-131.
SHI W J, QIN S, ZHANG C H, et al. Review of sea anemones compound and bioactivity [J]. Marine Science, 2013, 37(1):122-131.
- [15] 李阳. 中国海海葵目(刺胞动物门:珊瑚虫纲)种类组成与区系特点研究 [D]. 北京:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
LI Y. Species composition and faunistic characteristics of the order actiniaria (Cnidaria: Anthozoa) in Chinese Waters [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2013.
- [16] 刘少才. 会开花的海洋动物——海葵 [J]. 中国水产, 2019, 521(4):111.
LIU S C. Marine animals that can bloom—Anemone [J]. China Fisheries, 2019, 521(4):111.
- [17] 袁荣荣,何文辉,宋海燕,等. 环境因子对羽毛藻生

- 长的初步研究[C]//2015年中国环境科学学会学术年会论文集,2015.
- YUAN R R, HE W H, SONG H Y, et al. Preliminary study on the growth of *Caulerpa* sp by environmental factors [C]//Proceedings of the 2015 Annual Meeting of Chinese Society of Environmental Sciences, 2015.
- [18] 孙凯峰. 光照和株间混合比例对布朗葡萄藻群体生长的影响[D]. 广州:暨南大学,2009.
- SUN K F. Effect of light intensity and inoculation proportion on the population growth of *Botryococcus braunii* [D]. Guangzhou: Jinan University, 2009.
- [19] 陈若阳. 不同生长条件对大型海藻孔石莼光合生理生化特征的影响[D]. 广州:暨南大学,2017.
- CHEN R Y. Effects of different growth conditions on photo-physiological and biochemical characteristics of *Ulva lactuca* [D]. Guangzhou: Jinan University, 2017.
- [20] 曾呈奎, 夏邦美, 郑柏林, 等. 中国海藻志[M]. 北京:科学出版社,1999.
- ZENG C K, XIA B M, ZHENG B L, et al. Marine algal flora of China[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [21] 曾呈奎. 中国黄渤海海藻[M]. 北京:科学出版社,2009.
- ZENG C K. Marine algae flora in the Yellow Sea and Bohai Sea of China [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [22] 钱树本. 海藻学[M]. 青岛:中国海洋大学出版社,2014.
- QIAN S B. Algology [M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2014.
- [23] 刘涛. 南海常见大型海藻图鉴[M]. 北京:海洋出版社,2017.
- LIU T. Illustration of common large algal in South China Sea [M]. Beijing: Ocean Press, 2017.
- [24] 赵岩. 海葡萄人工规模养殖技术的研究[D]. 海口:海南大学,2016.
- ZHAO Y. Study on the large scale culture of *Caulerpa lentillifera* [D]. Haikou: Hainan University 2016.
- [25] 赵青松, 金珊, 陈寅儿. 石鳖的结构与习性[J]. 水生态学杂志, 2007, 27(3):46-47.
- ZHAO Q S, JIN S, CHEN Y E. Structure and habits of Polyplacophora [J]. Journal of Hydroecology, 2007, 27(3):46-47.
- [26] 陈道海, 孙世春. 9种石鳖壳板的形态研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(6):53-60.
- CHEN D H, SUN S C. Morphological study on shell plates of 9 species of Polyplacophora [J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2010, 40(6):53-60.
- [27] 孙瑞平, 杨德渐. 中国近海盘管虫属(多毛纲:龙介虫科)的研究 I [J]. 海洋科学集刊, 2000:116-135.
- SUN R P, YANG D J. Study on the *Hydroides* (Polychaeta: Serpulidae) from waters of China I [J]. Studia Marina Sinica, 2000:116-135.
- [28] 孙瑞平, 杨德渐. 中国近海龙介虫科(多毛纲:纓鳃虫目)的研究 II [J]. 海洋科学集刊, 2001:189-213.
- SUN R P, YANG D J. Study on Serpulidae (Polychaeta: Sabellida) from waters of China II [J]. Studia Marina Sinica, 2001:189-213.
- [29] 孙瑞平, 杨德渐. 中国近海龙介虫科和螺旋虫科(多毛纲:纓鳃虫目)的研究 III [J]. 海洋科学集刊, 2001:209-227.
- SUN R P, YANG D J. Study on Serpulidae and Spirorbidae (Polychaeta: Sabellida) from the waters of China III [J]. Studia Marina Sinica, 2001:209-227.
- [30] 严涛, 张慧, 李韵秋, 等. 污损性管栖多毛类生态特点及研究展望[J]. 生态学报, 2014, 34(21):6049-6057.
- YAN T, ZHANG H, LI Y Q, et al. Ecological characteristics and research prospects of fouling tubular Polychaete [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21):6049-6057.

(责任编辑 张冰)