

# 膨胀蔷薇珊瑚与壮实鹿角珊瑚的胚胎和幼虫发育

黄洁英<sup>1,2,3</sup>, 黄晖<sup>1,2</sup>, 张浴阳<sup>1</sup>, 杨剑辉<sup>1</sup>, 尤丰<sup>1</sup>

1. 中国科学院南海海洋研究所海洋生物资源可持续利用重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院海南热带海洋生物实验站, 海南 三亚 572000; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039

**摘要:** 造礁石珊瑚的有性繁殖是修复珊瑚礁生态系统的有效途径之一。文章为国内首次报道造礁石珊瑚有性繁殖和幼体发育过程, 为利用有性繁殖技术恢复珊瑚礁生态系统提供了发育生物学上的理论基础。海南省三亚市鹿回头海域的大部分珊瑚在 2009 年 3 月底至 4 月中发生有性繁殖行为。2009 年 4 月 11 日晚采集膨胀蔷薇珊瑚 *Montipora turgescens* 和壮实鹿角珊瑚 *Acropora robusta* 自然排放的受精卵, 研究其胚胎及幼虫发育的过程。通过连续观察和显微拍摄记录了 2 种珊瑚的受精卵发育过程, 结果显示, 受精卵经过分裂变为桑葚胚; 桑葚胚经过进一步发育变形为虾片状, 进而发育成盘状幼体; 盘状幼体由四周向内弯曲形成碗状的结构, 进而出现原肠胚及纤毛, 发育成为椭圆型或圆形的浮浪幼虫; 浮浪幼虫发生附着变态, 长出触手, 发育成珊瑚幼体。通过观察还发现, 膨胀蔷薇珊瑚的卵母细胞中本身就含有黄褐色虫黄藻, 壮实鹿角珊瑚的卵母细胞中没有虫黄藻, 其共生的虫黄藻是在发育过程中从周围环境获得的。

**关键词:** 膨胀蔷薇珊瑚; 壮实鹿角珊瑚; 珊瑚胚胎; 珊瑚幼虫发育; 虫黄藻; 附着变态

中图分类号: P735.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)02-0067-07

## Embryonic and larval development of *Montipora turgescens* and *Acropora robusta*

HUANG Jie-ying<sup>1,2,3</sup>, HUANG Hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu-yang<sup>1</sup>, YANG Jian-hui<sup>1</sup>, YOU Feng<sup>1</sup>

1. Key laboratory of Marine Bio-resources Sustainable Utilization, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China; 2. Tropical Marine Biological Research Station in Hainan, Sanya 572000, China; 3. Graduate University of CAS, Beijing 100039, China

**Abstract:** Sexual reproduction of hermatypic corals is one of the approaches for coral reef restoration. This study is about sexual reproduction actions and larvae development of hermatypic corals, and it is useful for artificial coral ecosystem restoration. Corals in Luhuitou Sanya spawned between the end of March and mid April. Eggs of *Montipora turgescens* and *Acropora robusta* were collected when they were spawned in seawater during the night of 11<sup>th</sup> April. The development of embryos of both species was recorded. Zygotes had cleaved to morulas, then developed to prawn-chip shape, and then blastulae. Next, blastulae invaginated, which made blastulae plate-like shape, and then the edge bent to center, which changed blastulae to bowl-like shape. Ciliated gastrulae were formed before they became elliptic or rounded planulae. Planulae developed to coral larvae with tentacles after they settled on substrata. Zygotes of *M. turgescens* had fulvous zooxanthellae while they were spawned. However, zygotes of *A. robusta* did not have zooxanthella as they were ejected, so they took free-living zooxanthellae from seawater during the development.

**Key words:** *Montipora turgescens*; *Acropora robusta*; coral embryo; coral larval development; zooxanthellae; settlement and metamorphosis

膨胀蔷薇珊瑚 *Montipora turgescens* 和壮实鹿角珊瑚 *Acropora robusta* 是形成珊瑚礁的重要种类。在

我国, 膨胀蔷薇珊瑚主要分布在西沙群岛和海南岛; 壮实鹿角珊瑚主要分布在南沙群岛、西沙群岛和海

收稿日期: 2010-07-22; 修订日期: 2010-09-13。蔡卓平编辑

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-227); 国家科技支撑计划项目 (2009BAB44B01); 海洋公益性行业科研专项 (201105012-2、201005012-6); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目 (40931160437); 国家自然科学基金项目 (40830850)

作者简介: 黄洁英(1984—), 女, 广东省韶关市人, 在读硕士研究生, 主要从事珊瑚培植修复技术研究。E-mail: jieying100@gmail.com

南岛<sup>[1]</sup>。Babcock 等<sup>[2]</sup>记录了 105 种造礁石珊瑚的排卵行为,发现膨胀蔷薇珊瑚和壮实鹿角珊瑚都是雌雄同体,排卵行为发生在满月后的第 6 天。Fadlallah<sup>[3]</sup>收集了 20 世纪初至 20 世纪 90 年代以来造礁石珊瑚有性繁殖的相关报道,其中只有一项关于壮实鹿角珊瑚有性繁殖的报道。目前尚未见这 2 种珊瑚的胚胎和幼虫发育过程的报道。

自 1990 以来,由于社会经济的发展,来自人类活动的压力越来越大,使得珊瑚礁的覆盖率迅速降低,珊瑚种类减少,珊瑚礁生物多样性下降<sup>[4-5]</sup>。膨胀蔷薇珊瑚和壮实鹿角珊瑚作为海南三亚珊瑚礁自然保护区的其中 2 个优势种,若能成功获得其珊瑚幼体,将对恢复珊瑚礁生态系统具有重要意义。2007 年李元超等<sup>[6]</sup>应用组织学分析佳丽鹿角珊瑚 *Acropora pulchra* 卵母细胞的发育情况,但并未观察到产卵过程和幼虫发育的过程。为了更好地掌握造礁石珊瑚的有性繁殖和发育过程,为珊瑚礁的保护和恢复提供更多的理论依据,作者于 2009 年 4 月在鹿回头进行珊瑚有性繁殖方面的调查与研究,并成功记录了膨胀蔷薇珊瑚和壮实鹿角珊瑚胚胎和幼虫的发育过程。

## 1 材料与方法

本研究主要在海南省三亚市鹿回头海域开展。收集该海区膨胀蔷薇珊瑚和壮实鹿角珊瑚的自然排放受精卵,产卵前取大于 20cm 的鹿角珊瑚作为观察对象,截取大于 5cm 的断枝,根据断面珊瑚卵子的颜色判断是否成熟。

采集精卵时间为 2009 年 4 月 11 日 22:30 前后,为膨胀蔷薇珊瑚开始排卵后 2h、壮实鹿角珊瑚开始排卵后 1h。当发现膨胀蔷薇珊瑚和壮实鹿角珊瑚产卵时,将带有塑料瓶的锥形网倒置在产卵珊瑚上,利用珊瑚卵的浮力让卵子自动进入塑料瓶中。受风浪影响,此方法收集卵子的效率低,且卵子易附着在网口与塑料瓶接口处。23:00 后利用滤网收集水面漂浮的受精卵,2 种方法均采用孔径为 200 $\mu\text{m}$  的滤网。收集的卵子立即放入船上盛有新鲜海水的塑料方桶中(26 $^{\circ}$ ),30min 后用气石连续充气。收集到的卵子为米黄色或红色,米黄色为膨胀蔷薇珊瑚的卵子,红色为壮实鹿角珊瑚的卵子。从收集受精卵后 1.5h 开始对其进行连续观察和显微拍照。卵子在方桶内暂养 2d 后转移入有循环水的养殖缸中(26.5 $^{\circ}$ ),暂养期间每天换 1/3 过滤海水。第 3 天投放附有红色珊瑚藻的珊瑚骨骼。

## 2 结果与分析

### 2.1 膨胀蔷薇珊瑚和壮实鹿角珊瑚的受精卵发育过程

2009 年 3 月中下旬,在中国科学院海南热带海洋生物实验站附近海域观察到多孔鹿角珊瑚 *Acropora millepora* 等珊瑚已经具有很成熟的卵子;3 月下旬发现并非所有的鹿角珊瑚都具有卵子,有些直径超过 20cm 的个体没有卵子;4 月 4 日调查多孔鹿角珊瑚,发现只有不到 1/4 的个体还具有卵子;4 月 7 日再次调查多孔鹿角珊瑚,发现已无具卵子的个体。由此可知多孔鹿角珊瑚在 4 月初已经排卵,而在实验站前的其他种类的鹿角珊瑚也在此时排卵。

2009 年 4 月 9 日在实验站南 1.5km 的一处珊瑚礁对壮实鹿角珊瑚采样时,发现在珊瑚枝断面有簇状的橙红色卵子(图 1a),每小簇包含了数个卵子。同一断枝的大多数珊瑚杯含有卵子,卵子距离珊瑚杯口处大概 0.5cm。4 月 11 日晚 21:00 下水观察壮实鹿角珊瑚,其个体大小直径约 1m,基部呈表覆状覆盖在岩石上,由基部生出粗壮的分枝向上生长,分枝高度约为 0.5m。此时壮实鹿角珊瑚的卵子已靠近口盘处,水螅体前端发生明显膨胀,整个珊瑚虫呈现粉红色,珊瑚虫的 12 只触手全部伸出并整齐地竖立在口盘四周(图 1b)。22:20 时壮实鹿角珊瑚开始产卵,最初为少数几个珊瑚虫将橙红色的卵子从口盘处挤出,卵子直径比整个珊瑚虫的口盘直径略小,每次只排出一个卵子,排出后的卵子缓慢浮上水面。排卵过程比较集中,几乎所有的珊瑚虫在同一时刻排卵。大量红色或粉红色的卵子被同时释放出来,精液也同时排出(图 1c),约 15min 后达到排卵高峰期。此时可以看到整棵珊瑚同时有数万卵子释放至水中。在水下可看到珊瑚上方的表层海水漂浮有 1 层卵子。同时对其他壮实鹿角珊瑚进行观察,发现多数也在排卵,但仍有少数个体未排卵。约 45min 后壮实鹿角珊瑚的排卵行为结束。4 月 12 日中午,对同一壮实鹿角珊瑚进行采样,发现其母体仍有卵子;晚上继续对珊瑚产卵过程进行观察,发现有部分母体在 22:15 时排卵,但数量远少于前晚;13 日晚未观察到其排卵行为。膨胀蔷薇珊瑚排卵前,可观察到珊瑚虫明显突起,包含的卵子突出骨骼外,其直径大于口盘直径。珊瑚虫的水螅体前端明显膨胀,12 只触手整齐地竖立在口盘四周,整个珊瑚虫呈米黄色(如图 1d)。

11 日晚 21:45 膨胀蔷薇珊瑚开始产卵。每个珊瑚虫独立释放卵子,释放卵子的速度比壮实鹿角珊

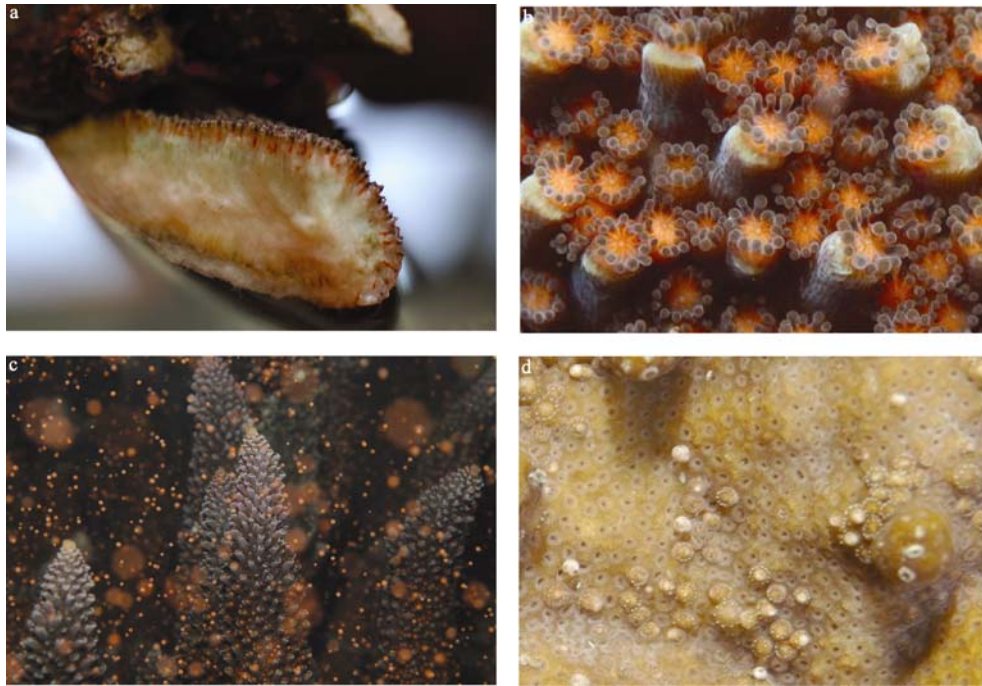


图 1 壮实鹿角珊瑚与膨胀蔷薇珊瑚有性繁殖过程

a. 壮实鹿角珊瑚在排卵前 1 周清晰可见珊瑚分枝断面处有簇状的橙红色卵子; b. 卵子在壮实鹿角珊瑚排卵前 1h 已位于水螅体的口盘处; c. 壮实鹿角珊瑚正在排卵; d. 膨胀蔷薇珊瑚正在排卵

Fig. 1 Sexual reproduction of *A. robusta* and *M. turgescens*

瑚慢, 未发现大量卵子同时释放的过程。白色或浅黄色的卵子从口盘释放后很快被水流带走, 并缓慢上升漂浮于水面。排完卵子的珊瑚虫的触手缩入珊瑚杯中。12 日晚和 13 日晚膨胀蔷薇珊瑚仍然有排卵行为, 其排卵持续时间长于壮实鹿角珊瑚。

## 2.2 膨胀蔷薇珊瑚胚胎及幼虫发育过程

膨胀蔷薇珊瑚产卵后 2h 受精卵开始分裂, 此时部分受精卵完成第 1 次卵裂, 少数进入第 2 次卵裂, 大部分受精卵还处于单细胞状态; 在显微镜下观察到受精卵体内的虫黄藻, 说明膨胀蔷薇珊瑚的卵母细胞中本身就含有黄褐色虫黄藻(图 2a—c)。4h 后, 受精卵已经发育成桑葚胚的雏形, 此时进入第 5 次卵裂, 每个细胞体内均有虫黄藻分布(图 2d、e)。5h 后, 出现  $64(2^6)$  细胞和  $128(2^7)$  细胞的桑葚胚。64 细胞期的桑葚胚多数为圆形, 也有少数发育成不规则形状; 128 细胞期时, 桑葚胚是扁圆形, 并非球形。桑葚胚经过进一步的发育, 变形为虾片状(图 2f), 进而发育成盘状幼体。盘状幼体四周较厚, 中间稍薄。8h 后, 盘状幼体开始发生由四周向内的弯曲, 逐渐形成碗状的结构(图 2g), 此变形的过程持续进行 6—16h。产卵后 25h, 盘状幼体基本消失。第 26 小时, 发现盘状幼体几乎完全闭合成原肠胚, 仅留有 1 个小孔未闭合, 这种全闭合或基本闭合的原肠

胚已经接近浮浪幼虫的形状(图 2h)。产卵后 34h, 出现椭圆型或圆形的浮浪幼虫(图 2i), 多数为圆形。该时期的浮浪幼虫具有活动能力, 但不具备明显的目的性, 只是转圈或随机游动。产卵后 97h, 观察到珊瑚幼虫黏附在附着基底上, 但并不发生形变, 稍微有水流冲过就会从基底上脱落, 并不是真正附着, 可能是在试探基底是否合适附着。通过显微镜可看到幼虫靠近基底试探后又放弃的过程。

## 2.3 壮实鹿角珊瑚胚胎及幼虫发育过程

壮实鹿角珊瑚的卵母细胞中没有虫黄藻, 说明其共生的虫黄藻是在发育过程中从周围环境获得。壮实鹿角珊瑚在产卵后 3h 内受精卵已经开始分裂, 此时只有少数受精卵处于 2 细胞和 4 细胞时期(图 3a—d)。在随后的 2h 内, 细胞进一步发育为 8、16、32 细胞(图 3e—f), 但是部分卵子不发育或发育畸形, 并且有出现破裂现象。产卵后的第 5 小时, 多数受精卵发育成 64 细胞期的圆形桑葚胚(图 3g), 也有少数发育成不规则形状。128 细胞期的桑葚胚为圆形(图 3h)。产卵后 6—7h, 桑葚胚变形为虾片状(图 3i), 进一步发育为盘状幼体; 再过 1h, 盘状幼体就开始发生由四周向内的弯曲, 逐渐形成碗状的结构(图 3j)。碗状结构逐渐闭合形成圆形的原肠胚, 在第 46 小时才观察到由原肠胚变形而来的纺锤形的浮

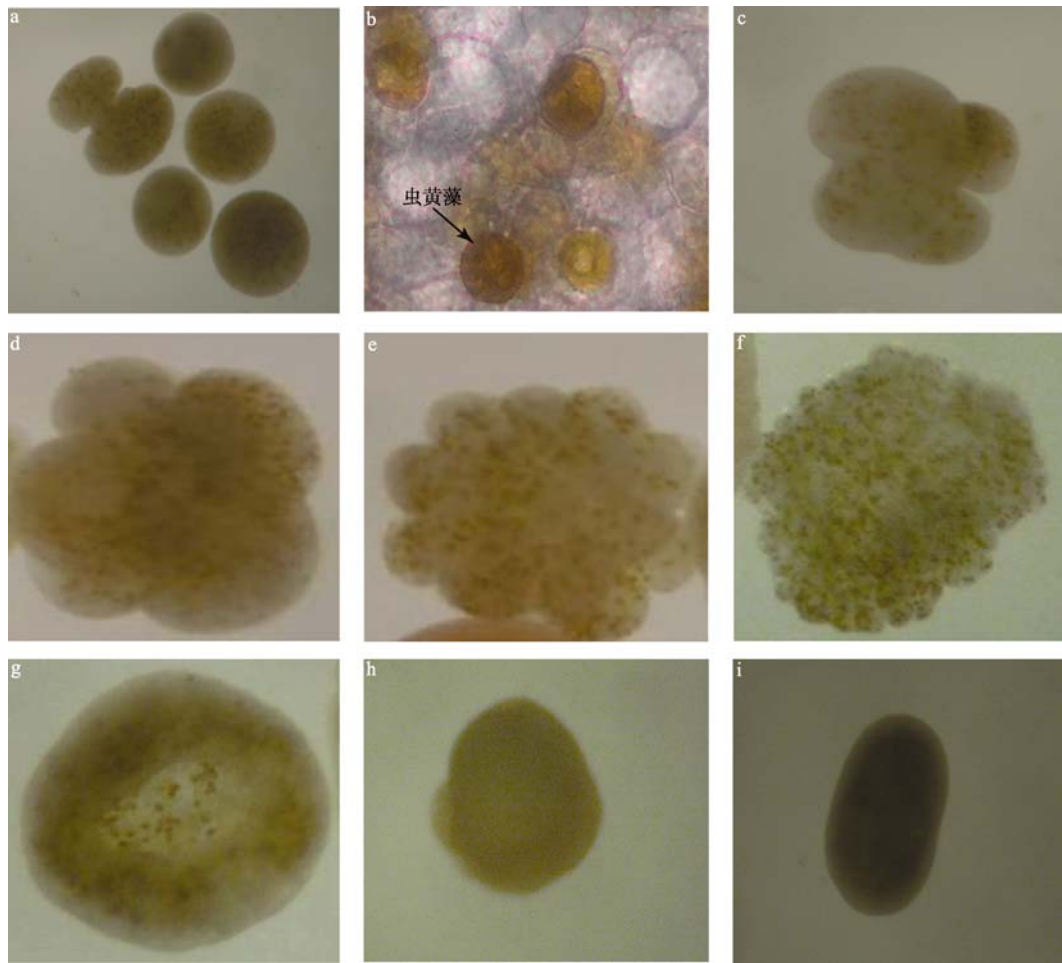


图2 膨胀蔷薇珊瑚由胚胎发育至浮浪幼虫的过程

a—c. 产卵后 2—3h, a 为单细胞和 2 细胞阶段, b 为显微镜下观察到的受精卵内的虫黄藻, c 为 4 细胞; d—e. 产卵后 4 h, 分别为 8 细胞和 32 细胞; f. 产卵后 5 h, 发育为桑葚胚; g. 产卵后 8 h, 由盘状幼体逐渐变形为碗状结构; h. 产卵后 26h, 全闭合或基本闭合的原肠胚已经接近浮浪幼虫的形状; i. 产卵后 34h, 椭圆型或圆形的浮浪幼虫, 具备活动能力

Fig. 2 Development of *M. turgescens* from embryos to planulae

浪幼虫(图 3k)。产卵后 97h, 观察到与同时期的膨胀蔷薇珊瑚相同的现象: 浮浪幼虫并不发生形变, 但易受弱水流影响附着后从基底上脱落, 在显微镜下可看到幼虫靠近基底试探后又放弃的过程(图 3l)。产卵后第 5 天下午, 浮浪幼虫发生附着, 可观察到正在变形过程中的幼虫(图 3m)。真正附着时以无口的那一端靠近基底, 并发生膨大, 有口一端向上, 随后整个浮浪幼虫由椭圆形或圆形变成碟形附着在附着基上, 口盘朝上(图 3n)。第 7 天晚上, 幼虫完全形变, 已经逐渐长出触手, 整个形状呈现为花朵状。此后 6 触手逐渐发育并伸展出来(图 3o)。由于养殖水体中没有游离的虫黄藻, 幼虫体内始终无虫黄藻出现。

### 3 讨论

#### 3.1 造礁石珊瑚的排卵行为

造礁石珊瑚种类繁多, 大多数珊瑚为雌雄同体,

少数为雌雄异体。珊瑚的有性繁殖方式也有 2 种: 一种是体外受精, 此类珊瑚占多数; 另一种是直接排放珊瑚幼虫, 如箭排孔珊瑚 *Seriatopora hystrix*、鹿角杯形珊瑚 *Pocillopora damicornis*、柱状珊瑚 *Stylophora pistillata* 等<sup>[7]</sup>。本次实验观察到膨胀蔷薇珊瑚和壮实鹿角珊瑚都是雌雄同体, 行体外受精, 这与 Babcock 等<sup>[2]</sup>的研究结果相符。

在对珊瑚繁殖活动的调查中发现, 2009 年三亚湾鹿回头的珊瑚产卵行为集中在 3 月底至 4 月中旬, 比 2008 年的繁殖期提前近 1 个月, 并且不同种类珊瑚的繁殖时间有差异。在 2009 年 3 月底调查时多孔鹿角珊瑚尚有卵子在体内, 但在 4 月 4 日对其再次取样时发现体内已无卵子, 说明多孔鹿角珊瑚在这段时间内完成繁殖行为。膨胀蔷薇珊瑚和壮实鹿角珊瑚的繁殖活动则要迟于多孔鹿角珊瑚 10d 左右。Babcock 等<sup>[2]</sup>记录的多孔鹿角珊瑚在月圆后 3—7d



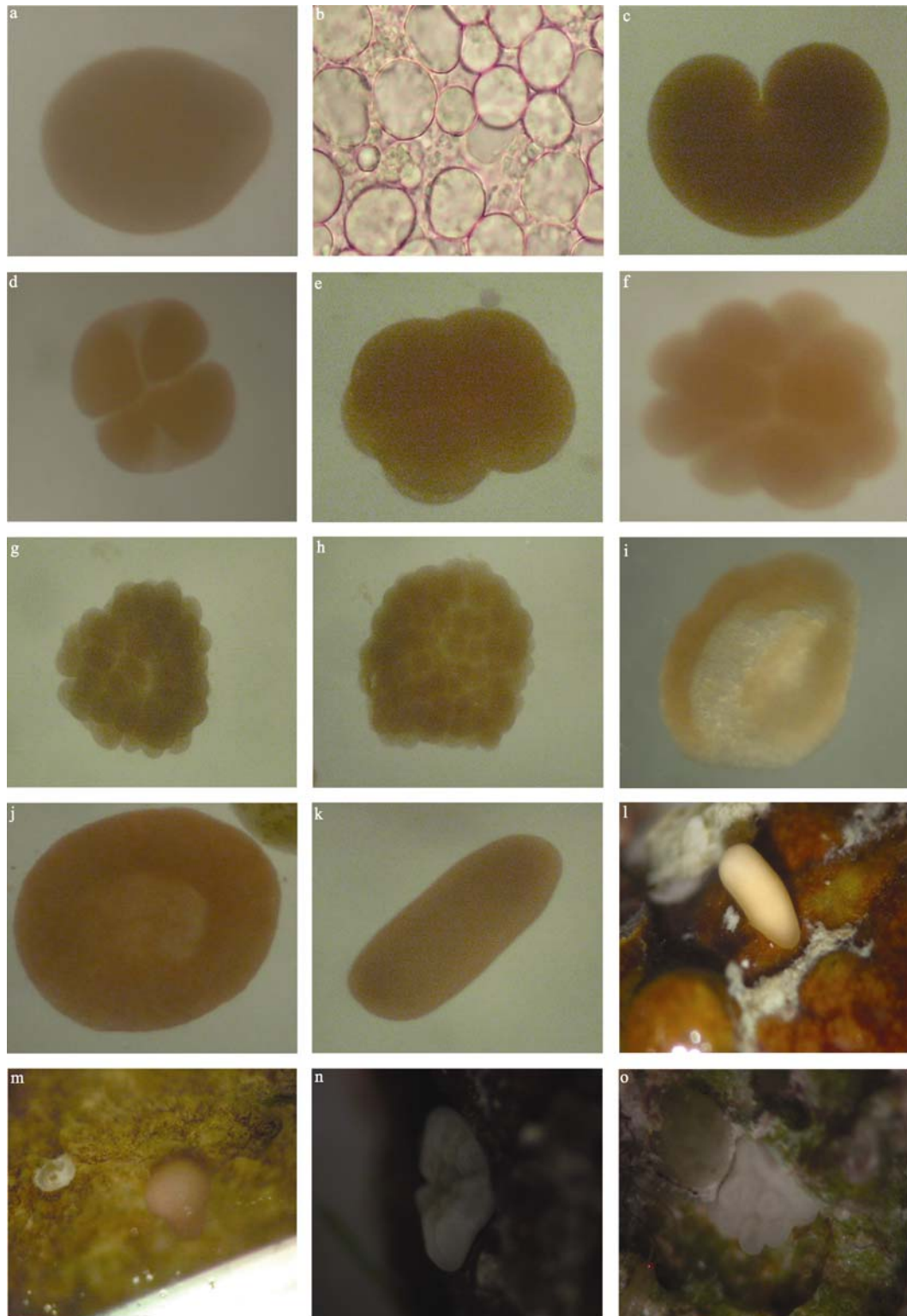


图 3 壮实鹿角珊瑚由胚胎发育至浮浪幼虫的过程

a—d. 产卵后 3h, 分别为单细胞、2 细胞、4 细胞时期, b 在显微镜下观察无虫黄藻; e—h. 产卵后 4—5h, 由 8 细胞逐渐发育为桑基胚; i—j. 产卵后 6—8h, 虾片状的盘状幼体逐渐变形为碗状结构; k. 产卵后 46h, 纺锤形的浮浪幼虫; l. 产卵后 97h, 浮浪幼虫发生试探性附着; m—n. 产卵后第 5—6 天, 浮浪幼虫真正附着并逐渐变形; o. 发育形成六触手

Fig. 3 Development of *A. robusta* from embryos to planulae

后产卵, 膨胀蔷薇珊瑚和壮实鹿角珊瑚在月圆后 6d 产卵, 其珊瑚种间繁殖时间的差异要小于这次实验

所观察到的。珊瑚的排卵时间受水温、月相等多种因素的影响而有差异<sup>[8]</sup>, 所以珊瑚产卵的时间也每

年各不相同。通过近几年对三亚珊瑚繁殖行为的监测,发现三亚珊瑚产卵的时间应在3月底至5月初之间。

不同种类珊瑚的排卵频率有差别,例如丘突鹿角珊瑚 *Acropora abrotanoides* 排卵行为只发生在夏季,为1年1次;而粗野鹿角珊瑚 *Acropora humilis* 的排卵行为全年可见<sup>[3]</sup>。有些种类的珊瑚排卵较慢,表现为卵子独立释放,而有些表现为同步大量释放卵子<sup>[2]</sup>。蔷薇珊瑚的卵子较鹿角珊瑚的卵子小,而且细胞中有共生虫黄藻,可以很快地区分2种卵子以便于发育过程的观察。本研究中的2种珊瑚均为每年排卵1次,且发生在春末夏初。膨胀蔷薇珊瑚每个珊瑚虫独立释放卵子,未观察到大量卵子同时释放的过程;而壮实鹿角珊瑚其排卵过程比较集中,几乎所有的珊瑚虫在同一时刻排卵。

### 3.2 膨胀蔷薇珊瑚和壮实鹿角珊瑚胚胎及幼虫的发育特点

通常成熟的珊瑚母体卵细胞受精后经过胚胎及幼虫发育过程而形成珊瑚幼体。受精卵经过4次分裂变成桑葚胚,进入囊胚期。桑葚胚的形状因种类而不同,如本研究中发现膨胀蔷薇珊瑚的桑葚胚为扁圆形,而壮实鹿角珊瑚的为圆形。囊胚期时间较短,主要发生卵裂出现一系列形变,进而逐渐发育成纺锤形的浮浪幼虫,进入幼虫时期。在浮浪幼虫发生附着前,一般处于浮游状态,有较活跃的游动行为。浮浪幼虫沉底后开始发生附着变态,长出触手,发育成珊瑚幼体。然而,不同种类的珊瑚在有性繁殖过程中发生的形态变化有差异,本研究未发现膨胀蔷薇珊瑚和壮实鹿角珊瑚形态变化过程存在明显差别。

本研究在收集受精卵的当晚,观察到珊瑚排卵后海面有大片漂浮的珊瑚卵,这些受精卵随水流散播,成功发育到幼虫时期的个体将在合适的条件下发生附着,继续生长。这一过程经历的时间因种类不同存在较大的差异。Babcock 等<sup>[9]</sup>的研究记录了19种珊瑚的有性繁殖过程,发现第1次卵裂的时间为产卵后2h,24h后最早出现浮浪幼虫,产卵后第4天发生附着变态;由浮浪幼虫到发生附着经历的时间为3—10d。Nozawa 等<sup>[10]</sup>发现海孔蜂巢珊瑚 *Favites halicora* 和粗糙菊花珊瑚 *Goniastrea aspera* 分别在产卵后第56—63天和第63—70天发生附着。由此可见,在珊瑚有性繁殖的过程中,从排卵到发育为

珊瑚幼体需要经历相当长的时间,而幼虫在这段时间内都处于浮游状态。浮浪幼虫具有一定的游动能力,并逐渐表现为有目的性的活动,这也是帮助附着发生从而提高珊瑚幼体数量的最佳时期。人们企图通过加入外源物质如藻类<sup>[11]</sup>、附着板<sup>[3, 12-16]</sup>等促进附着发生,并人为控制环境因子<sup>[17]</sup>如温度来加快发育速度。Shlesinger 等<sup>[18]</sup>认为浮浪幼虫变形和附着是珊瑚生活史的关键阶段;Hariri 等<sup>[19]</sup>研究发现口和原肠腔的发育是决定其存活的关键。因此,对各种造礁石珊瑚的有性繁殖过程进行具体研究,有助于探究其真正的发生机制,可为成功进行珊瑚礁恢复提供理论基础。

Hirose 等<sup>[20]</sup>研究发现,与珊瑚母体共生的虫黄藻通过卵囊细胞进入卵母细胞中,此行为发生在珊瑚产卵前的第5—7天。本研究证实了膨胀蔷薇珊瑚的共生虫黄藻来自卵母细胞,而壮实鹿角珊瑚需要从外界环境中获取虫黄藻。但是在壮实鹿角的整个胚胎及幼虫发育过程中,并未观察到其共生虫黄藻的出现,这可能是由于养殖用水是过滤后的海水,所以环境中缺乏它所需的虫黄藻。此次对膨胀蔷薇珊瑚有性繁殖的观察,只持续到产卵后的第97小时,发现与其共生的虫黄藻减少。关于珊瑚虫自身获取虫黄藻的机制,以及虫黄藻类型因环境变化和发育阶段不同而存在差别等问题有待进一步的研究。

## 4 结论

通过对三亚市鹿回头海域造礁石珊瑚有性繁殖行为的调查和监测,发现该海域珊瑚产卵的时间在每年3月底至5月初之间。2009年多孔鹿角珊瑚在4月初排卵,壮实鹿角珊瑚和膨胀蔷薇珊瑚在4月11日开始排卵,并持续进行2—3d。成熟的卵子大小约为300 μm。本研究中2种珊瑚的胚胎和幼虫发育过程为:受精卵—桑葚胚—虾片状结构—碗状结构—浮浪幼虫。膨胀蔷薇珊瑚在产卵后34h出现圆形的浮浪幼虫,而壮实鹿角珊瑚的浮浪幼虫在第46小时才观察到。2种珊瑚的浮浪幼虫均在产卵后第97小时发生明显的附着行为。本次研究还发现,膨胀蔷薇珊瑚的共生虫黄藻从母体获得,而壮实鹿角珊瑚的共生虫黄藻是在发育过程中从周围环境获得。本研究为国内首次记录造礁石珊瑚的有性繁殖行为,为以后利用珊瑚有性繁殖进行珊瑚礁生态系统修复提供了借鉴。

## 参考文献

- [1] 邹仁林. 中国动物志: 腔肠动物门: 珊瑚虫纲: 石珊瑚目: 造礁石珊瑚[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 36–55.
- [2] BABCOCK R C, BULL G D, HARRISON P L, et al. Synchronous spawnings of 105 scleractinian coral species on the Great Barrier Reef[J]. Marine Biology, 1986, 90(3): 379–394.
- [3] FADLALLAH Y H. Sexual reproduction, development and larval biology in scleractinian corals[J]. Coral Reefs, 1983, 2(3): 129–150.
- [4] 董志军, 黄晖, 黄良民, 等. 运用 PCR-RFLP 方法研究三亚鹿回头岸礁造礁石珊瑚共生藻的组成[J]. 生物多样性, 2008, 16(5): 498–502.
- [5] 刘瑞玉. 人类活动对底栖生物多样性的影响[C]//海岸海洋资源与环境研讨会, 1998: 39–46.
- [6] 李元超, 黄晖, 董志军, 等. 鹿回头佳丽鹿角珊瑚卵母细胞发育的组织学研究[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(1): 57–60.
- [7] FAN TUNGYUNG, LI JANJUNG, LE SHENGXIAN, et al. Lunar periodicity of larval release by pocilloporid corals in southern Taiwan[J]. Zoological Studies, 2002, 41(3): 288–294.
- [8] VAN WOESIK R, LACHARMOISE F, KOKSAL S. Annual cycles of solar insolation predict spawning times of Caribbean corals[J]. Ecology Letters, 2006, 9(4): 390–398.
- [9] BABCOCK R C, HEYWARD A J. Larval development of certain gamete-spawning scleractinian corals[J]. Coral Reefs, 1986, 5(3): 111–116.
- [10] NOZAWA Y, HARRISON P L. Temporal settlement patterns of larvae of the broadcast spawning reef coral *Favites chinensis* and the broadcast spawning and brooding reef coral *Goniastrea aspera* from Okinawa, Japan[J]. Coral Reefs, 2005, 24(2): 274–282.
- [11] VERMEIJ M J A, SMITH J E, SMITH C M, et al. Survival and settlement success of coral planulae: independent and synergistic effects of macroalgae and microbes[J]. Oecologia, 2009(2), 159: 325–336.
- [12] OKAMOTO M, NOJIMA S, FUJIWARA S, et al. Development of ceramic settlement devices for coral reef restoration using in situ sexual reproduction of corals[J]. Fisheries Science, 2008, 74(6): 1245–1253.
- [13] PETERSEN D, WIETHEGER A, LATERVEER M. Influence of different food sources on the initial development of sexual recruits of reefbuilding corals in aquaculture[J]. Aquaculture, 2008, 277(3/4): 174–178.
- [14] BRADLEY P, FISHER W S, BELL H, et al. Development and implementation of coral reef biocriteria in US jurisdictions[J]. Environ Monit Assess, 2009, 150(1/4): 43–51.
- [15] HEYWARD A J, NEGRI A P. Natural inducers for coral larval metamorphosis[J]. Coral Reefs, 1999, 18(3): 273–279.
- [16] KRUPP D A. Sexual reproduction and early development of the solitary coral *Fungia scutaria* (Anthozoa: Scleractinia)[J]. Coral Reefs, 1983, 2: 159–164.
- [17] OMORI NOTMM. When fragmented coral spawn? Effect of size timing on survivorship and fecundity of fragmentation in *Acropora formosa*[J]. Mar Biol, 2007, 151(1): 353–363.
- [18] SHLESINGER Y, LOYA Y. Larval development and survivorship in the corals *Favia fava* and *Platygyra lamellina*[J]. Hydrobiologia, 1991, 216/217(1): 101–108.
- [19] HARI S, YASUDA N, RODRIGUEZ-LANETTY M, et al. Onset of symbiosis and distribution patterns of symbiotic dinoflagellates in the larvae of scleractinian corals[J]. Marine Biology, 2009, 156(6): 1203–1212.
- [20] HIROSE M, KINZIE R, HIDAKA M. Timing and process of entry of zooxanthellae into oocytes of hermatypic corals[J]. Coral Reefs, 2001, 20(3): 273–280.