

# 肉质扁脑珊瑚的有性繁殖及早期发育

肖宝华<sup>1,2</sup>, 廖宝林<sup>2</sup>, 杨小东<sup>2</sup>, 谢子强<sup>3</sup>

1. 广东海洋大学, 广东 湛江 524025;

2. 广东海洋大学深圳研究院, 广东 深圳 518108;

3. 深圳市碧海蓝天海洋科技有限公司, 广东 深圳 518108

**摘要:** 在实验室养殖的条件下对肉质扁脑珊瑚 *Platygyra carnosus* 的有性繁殖进行初步观察, 收集其排放的精卵进行受精, 同时记录了肉质扁脑珊瑚早期发育各个时期的形态特征。观察结果表明, 肉质扁脑珊瑚为雌雄同体, 体外受精, 在月圆后第 9 天开始出现排卵现象, 第 11 天排卵量达到最大。肉质扁脑珊瑚的卵为粉红色圆球形。在水温  $27\pm0.5^{\circ}\text{C}$  的条件下, 肉质扁脑珊瑚早期发育共经历 5 个发育阶段 17 个时期, 受精卵经 48h 发育为浮浪幼虫, 96h 以后开始寻找基底进行附着。本研究为国内首次记录和报道肉质扁脑珊瑚的有性繁殖及胚胎发育过程, 可以为石珊瑚的生态修复积累理论依据。

**关键词:** 肉质扁脑珊瑚; 有性繁殖; 胚胎发育

中图分类号: Q954.4; Q958.8 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2017)01-0065-07

## Sexual reproduction and early development of *Platygyra carnosus*

XIAO Baohua<sup>1,2</sup>, LIAO Baolin<sup>2</sup>, YANG Xiaodong<sup>2</sup>, XIE Ziqiang<sup>3</sup>

1. Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524025, China;

2. Shenzhen Research Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen 518108, China;

3. Shenzhen Ocean Hyaline Marine Science and Technology Co., Ltd. Shenzhen 518108, China

**Abstract:** Sexual reproduction of *Platygyra carnosus* was observed preliminarily under the condition of artificial culture. Eggs and sperms of *Platygyra carnosus* were collected when they were spawned. The morphological characteristics in early development of *Platygyra carnosus* during different periods were recorded and described. The results showed that the corals were hermaphrodites, in vitro fertilization, and began spawning on the ninth day after the full moon, then the spawning quantity of corals increased to the maximum on the 11th day after the full moon. The eggs of *Platygyra carnosus* were spherical in shape and pink in color. The early development process underwent five phases and 17 stages under the conditions of  $27\pm0.5^{\circ}\text{C}$ . The fertilized eggs developed into planula in 48 h and the larvae began to settle after 96 h. The sexual reproduction and early development of *Platygyra carnosus* were reported for the first time in China.

**Key words:** *Platygyra carnosus*; sexual reproduction; early development

珊瑚礁生态系统作为地球上最复杂、生物种类最丰富的海洋生态系统之一, 为海洋提供了巨大的生产力资源和物种多样性。由于受到气候变暖、渔

业资源捕捞、海洋污染等因素的影响, 作为珊瑚礁系统基础的石珊瑚覆盖率正在迅速降低。在我国, 徐闻珊瑚礁是中国大陆沿岸面积最大、珊瑚种类最

收稿日期: 2016-04-28; 修订日期: 2016-09-06。林强编辑

基金项目: 广东省公益研究与能力建设专项 (K15216); 广东省海洋渔业科技推广专项(A201308E02); 大鹏新区产业发展专项(DPKJ201500080)

作者简介: 肖宝华(1978—), 男, 福建省长乐市人, 硕士, 主要从事海洋生态学研究。电话: 0759-2396216, E-mail: gdouxxhpaper@126.com

**Received date:** 2016-04-28; **Revised date:** 2016-09-06. Editor: LIN Qiang

**Foundation item:** Public Welfare Research and Capacity Building of Guangdong Province (K15216); Marine Fishery Science and Technology Promotion Project in Guangdong Province (A201308E02); Dapeng New District Development Projects (DPKJ201500080)

**Corresponding author:** XIAO Baohua. E-mail: gdouxxhpaper@126.com

多、连片最为完整的珊瑚岸礁(黄晖等, 2011)。2008年徐闻珊瑚礁保护区石珊瑚的调查显示, 徐闻珊瑚礁保护区海域拥有11科28属54种石珊瑚, 其中以滨珊瑚科、蜂巢珊瑚科、木珊瑚科、鹿角珊瑚科为主要优势种群(廖宝林等, 2011), 但在近几年的珊瑚普查调查中, 徐闻珊瑚礁保护区中的石珊瑚已经有了明显退化趋势。石珊瑚的生态修复成为目前珊瑚研究的一个热点, 国外已有通过有性繁殖(Guest et al, 2010)、断枝移植(Gomez et al, 2011)、微电场刺激(Van Treeck et al, 1997)等方法进行生态修复的报道。

肉质扁脑珊瑚*Platygyra carnosus*为徐闻珊瑚礁保护区常见的扁脑珊瑚品种, 隶属珊瑚虫纲(Anthozoa Ehrenberg)、六放珊瑚亚纲(Hexacorallia)、石珊瑚目(Scleractinia)、蜂巢珊瑚科(Faviidae)、扁脑珊瑚属(*Platygyra*), 多以大型的团块出现, 整体外表肥厚多肉, 水底生活时呈砖红色或浅绿色。该物种珊瑚杯呈现多角形或亚勾回形, 杯壁锐利而被肉质的珊瑚组织所掩盖; 珊瑚可长成大型群体, 群体顶部通常呈浑圆的塔状, 看似一座迷你堡垒(邹仁林等, 2001)。国内外对肉质扁脑珊瑚的生理、遗传多样性、分子系统进化已有相关的报道。Sun等(2013)对香港附近海域的肉质扁脑珊瑚的转录组数据进行分析, 为石珊瑚的功能基因研究提供了宝贵的理论基础。Chiu等(2012)对肉质扁脑珊瑚骨骼生长异常与细菌的关系进行深入的研究。Wang等(2013)利用长聚合酶链式反应技术扩展出肉质扁脑珊瑚的线粒体全序列, 为蜂巢珊瑚科系统进化分析提供了宝贵的理论基础。但迄今为止, 国内外仍然未见有关肉质扁脑珊瑚有性繁殖的详细报道。

自20世纪初至今, 国外学者对石珊瑚的有性繁殖和早期发育做了大量的记录和报道, Fadlallah (1983)收集了20世纪初至20世纪80年代以来146种石珊瑚有性繁殖的相关报道。Babcock等(1986b)对澳大利亚大堡礁海域的19种石珊瑚的胚胎发育和幼虫发育进行了记录, 并制作了中华扁脑珊瑚胚胎的切片进行研究, 发现中华扁脑珊瑚*Platygyra sinensis*的内胚层形成来自胚层的内移。Richmond等(1990)比较了加勒比海、太平洋热带地区和红海三个地区石珊瑚的有性繁殖差异。在国内, 李元超等(2009)对佳丽鹿角珊瑚的卵母细胞发育进行了观察, 黄洁英等(2011)对膨胀蔷薇珊瑚*Montipora turgescens*与壮实鹿角珊瑚*Acropora robusta*的早期发育进行了翔实的记录, 朱潜等(2014)也对海南三亚的风信子鹿

角珊瑚*Acropora hyacinthus*早期发育进行了研究, 张诗泽等(2016)对多孔鹿角珊瑚和丛生盔形珊瑚性腺组织进行了观察。相比国外, 国内有关造礁珊瑚有性繁殖的研究报道不多。

本研究是国内首次对肉质扁脑珊瑚有性繁殖和早期发育过程进行观察和描述, 为珊瑚礁的保护和生态修复提供可靠的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本研究使用的肉质扁脑珊瑚亲本(3株)为2015年4月15日采自广东徐闻珊瑚礁国家级自然保护区实验区海域, 采集过程尽量不破坏珊瑚整体的完整性, 在采集箱中加入足够多的海水同时采取避光措施避免珊瑚在运输过程中暴露在空气和强光线下。运输回来的珊瑚迅速转移到人工养殖生态系统里进行人工暂养。采集的肉质扁脑珊瑚样本除了用肉眼进行形态学鉴定外, 切取部分较小的样品进行骨骼的形态学鉴定, 确认其为肉质扁脑珊瑚。同时也对其性腺发育程度进行了观察, 推断其性腺已经开始发育, 但还尚未在海区内进行有性繁殖。

### 1.2 试验方法

采用深圳市碧海蓝天海洋科技有限技术公司研发的双层空间生态自净循环系统对采集回来的肉质扁脑珊瑚进行人工条件暂养。水质条件进行如下控制: 盐度变化范围在32‰~35‰, 溶解氧含量变化范围在7.71~7.84 mg·L<sup>-1</sup>, pH变化范围在8.0~8.3, 水温变化范围在26~28℃。在养殖系统中还配有造流和光照设备模拟珊瑚生长的自然环境, 确保实验珊瑚在健康的生长环境下进行有性繁殖。

在进行人工有性繁育之前用高锰酸钾对实验的容器和工具进行消毒, 使用200目的筛网对实验海水进行过滤。在月圆(2015年5月4日)前2d开始密切观察养殖系统中的肉质扁脑珊瑚是否出现排卵现象。发现排卵现象后, 马上将排卵的珊瑚个体转移至17L的实验容器中进行精卵的采集。精卵采集完毕后每隔10min对进行搅拌混匀, 使其充分受精, 直至镜检发现受精卵分裂, 再将其移入200L的实验容器中进行胚胎孵化。孵化过程中每隔15min搅拌一次, 防止胚胎黏附在容器壁上。同时, 使用增氧机微弱打气, 保持容器中溶解氧的水平。每隔1h换掉容器中1/10体积的海水, 保持其水质良好和水温的稳定。使用德国Leica公司的DM500生物显微镜及其数码分析系统对肉质扁脑珊瑚胚胎发育进行观察

和拍照记录, 从受精卵开始每隔 30min 对胚胎发育进行一次镜检, 直至胚胎进入原肠期后, 改为 3h 一次镜检。在精卵采集结束, 受精 2h 后进行计数, 统计受精率。

2 结果

2.1 肉质扁脑珊瑚有性繁殖过程

在对肉质扁脑珊瑚进行为期一个月的暂养后, 2015年5月12日(月圆后9d), 陆续发现暂养的部分肉质扁脑珊瑚出现排卵现象。排卵前珊瑚杯逐渐鼓起, 口慢慢裂开, 粉红色卵子从口盘处挤出, 在排卵的同时也伴随着大量的精子从口盘排出, 此次珊瑚排卵总共持续了3d。5月14日(月圆后11d)晚上, 部分肉质扁脑珊瑚排卵量达到最大。肉质扁脑珊瑚为雌雄同体珊瑚, 可以进行同体受精, 排出的卵子为粉红色球形浮卵, 排出的精子呈烟雾状或絮状。在显微

镜下使用标尺估算卵子直径为 $350 \pm 30 \mu\text{m}$ 。选取排卵情况最好的肉质扁脑珊瑚个体单独放到17L的实验容器中进行精卵的收集。排卵排精时间大约持续了1h。在排卵排精结束2h后, 观察到部分受精卵开始卵裂, 进入卵裂期。统计排出珊瑚卵约有 $2.3 \times 10^6$ 个。

2.2 肉质扁脑珊瑚早期发育过程

精卵排放结束后 2h, 将 17L 实验容器内的肉质扁脑珊瑚胚胎转移至 200L 的实验容器中进行孵化, 对受精卵的数量进行统计, 此次珊瑚排卵的受精率达到 75%。在海水温度  $27 \pm 0.5^\circ\text{C}$  条件下, 实验容器中的肉质扁脑珊瑚胚胎发育较为同步, 总共经历 96h。根据胚胎和幼虫发育的形态变化, 肉质扁脑珊瑚的早期发育可划分为 5 个发育阶段: 受精卵、卵裂、囊胚、原肠胚、浮浪幼虫。5 个发育阶段又可细分为 17 个时期。肉质扁脑珊瑚胚胎发育进程如表 1 和图 1 所示。

表 1 肉质扁脑珊瑚早期发育过程

Tab. 1 Early development of *Platygyra carnosus*

受精后时间	胚胎发育时期	主要发育特征	图示
0	受精卵	受精卵呈粉红色圆球状	图 1a
2h	2 细胞期	受精卵分裂成大小相等的 2 个细胞	图 1b
3h30min	4 细胞期	受精卵进一步分裂成 4 个细胞	图 1c
4h30min	16 细胞期	受精卵进一步分裂成 16 个细胞, 分裂球在胚胎的分布变得不规则	图 1d
5h30min	32 细胞期	受精卵进一步分裂成 32 个细胞	图 1e
6h	桑葚胚期	受精卵进一步分裂成 64~128 个细胞, 细胞团与桑葚球非常相似, 胚胎呈不规则形态	图 1f
7h	囊胚早期	受精卵进一步分裂成 128 个以上的细胞, 此时胚胎表面变得平滑, 中央出现细胞内陷, 形成假胚孔	图 1g
8h	囊胚中期	囊胚进一步分裂, 胚胎变得扁平, 发育为坐垫状, 凹面继续内陷, 假胚孔加深且表面更加平滑	图 1h
9h	囊胚晚期	坐垫状囊胚逐渐收拢形成一个球状胚体, 假胚伴随此过程逐渐孔消失	图 1i
15h	原肠胚早期	在极短时间内胚胎表面形成两个胚孔	图 1j
17h	原肠胚中期	两个胚孔进一步扩大并最终融合成一个胚孔, 胚孔内陷形成原口, 由于细胞的迁移开始形成两个胚层的分化	图 1k
24h	原肠胚晚期	原肠胚的原口开始逐渐闭合, 胚体逐渐拉长成椭圆形或梨形	图 1l
36h	原肠胚末期	原肠作用临近结束, 原口封闭完成, 胚胎发育结束	图 1m
48h	浮浪幼虫早期	浮浪幼虫维持椭圆形或梨形的形态, 此时外胚层已发育出鞭毛的结构, 已经具备游泳能力	图 1n
58h	浮浪幼虫中期	浮浪幼虫形态明显, 形态拉长为圆柱状, 可在显微镜底下清晰观察到胚体内两个胚层, 幼虫开始四处游动	图 1o
84h	浮浪幼晚期	浮浪幼虫内部分化明显, 内胚层发育出肠系膜	图 1p
96h	浮浪幼末期	游动能力加强, 开始尝试寻找基质附着	图 1q

受精 2h 内, 配子处于受精卵阶段, 受精卵仍然呈粉红色圆球状, 漂浮在水面上。受精 2h 后, 肉质扁脑珊瑚胚胎从受精卵进入到卵裂阶段, 卵裂阶段可分为 5 个时期: 2 细胞期、4 细胞期、16 细胞期、32 细胞期、桑葚胚期。大部分胚胎几乎同时开始第一次卵裂, 卵裂沟首先出现在受精卵的一侧, 随后渐渐延伸到受精卵的另外一侧, 最后水平均等地分

裂出 2 个分裂球。受精进入 3h30min, 2 细胞时期的胚胎再次进行均等卵裂进入 4 细胞时期。此后几乎每隔 1h, 胚胎都会进入下一个卵裂时期。当卵裂进入 16 细胞期后, 分裂球开始呈不规则分布, 并包裹着一个空腔进行分裂, 这个空腔随后将发育成囊胚腔(图 2a)。经 6h 发育, 受精卵由原先的单个细胞卵裂成 128 个细胞以上的桑葚胚。

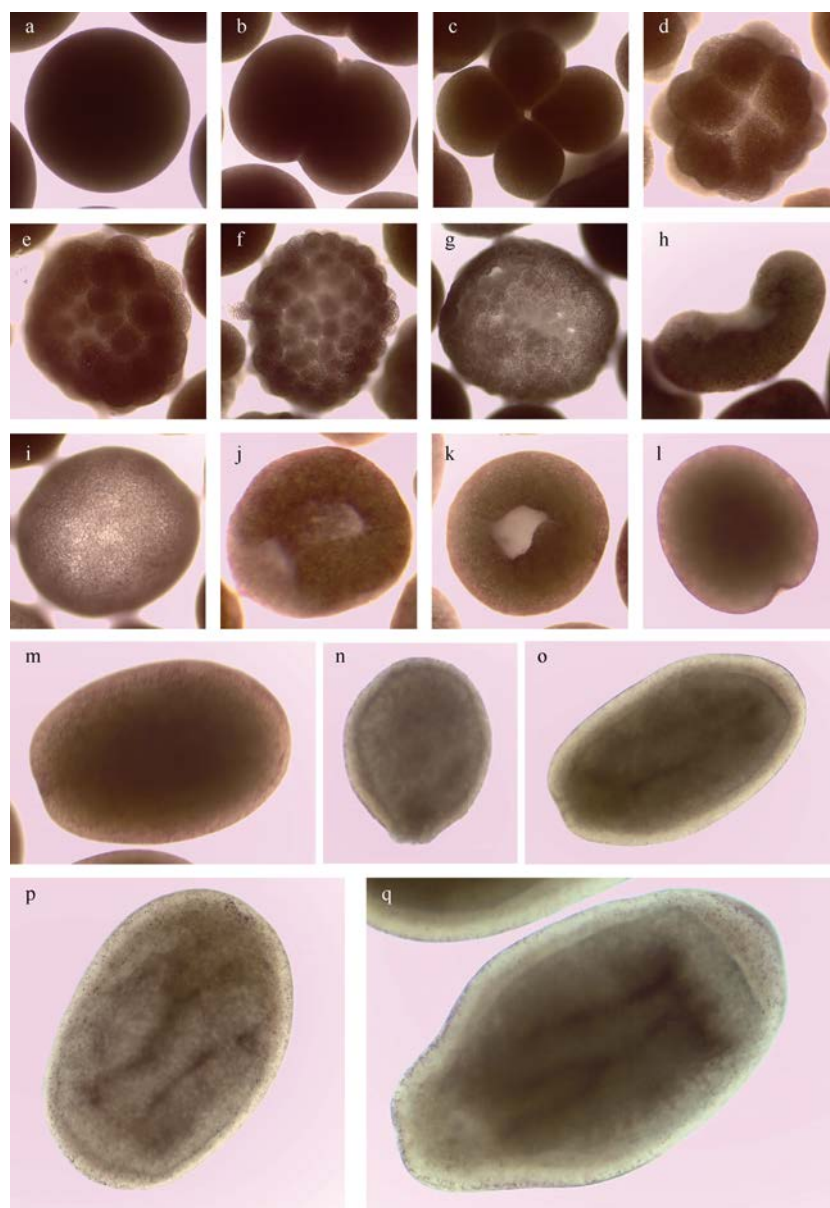


图 1 肉质扁脑珊瑚早期发育过程

a. 受精卵; b. 2细胞期; c. 4细胞期; d. 16细胞期; e. 32细胞期; f. 桑葚胚期; g. 囊胚早期; h. 囊胚中期; i. 囊胚晚期; j. 原肠早期; k. 原肠中期; l. 原肠晚期; m. 原肠末期; n. 浮浪幼虫早期; o. 浮浪幼虫中期; p. 浮浪幼虫晚期; q. 浮浪幼虫末期

Fig. 1 Morphology of early development of *P. carnosus*

a) Fertilized egg; b) 2-cell stage; c) 4-cell stage; d) 16-cell stage; e) 32-cell stage; f) Morula stage; g) Early blastula stage; h) Middle blastula stage; i) Later blastula stage; j) Early gastrula stage; k) Middle gastrula stage; l) Later gastrula stage; m) The end of gastrula stage; n) Early planula phase stage; o) Middle planula phase stage; p) Later planula phase stage; q) The end of planula phase stage;

受精 7h 后, 胚胎从卵裂阶段进入囊胚阶段, 近年来, 许多学者对不同石珊瑚的囊胚发育进行研究, 根据囊胚腔是否保留将石珊瑚的囊胚分为两大类, 一类是不存在囊胚腔的虾片状囊胚, 一类是较为扁平但仍留有囊胚腔的坐垫状囊胚(Marlow et al, 2007; Okubo et al, 2013)。肉质扁脑珊瑚的囊胚具有囊胚腔结构(根据胚胎中央透光的程度判断), 属于坐垫状囊胚。囊胚阶段可分为三个时期: 囊胚早期、囊胚中期和囊胚晚期。桑葚胚进一步分裂, 进入囊胚早期, 此时外层的分裂细胞开始在水平面上逐渐向外

延伸生长, 而内层细胞在外层细胞过快生长挤压下向内形成凹面, 胚胎形态也由不规则的桑葚状渐渐变为较扁平的坐垫状, 凹面逐渐形成一个开口, 国外学者将其称之为“假胚孔”(图 2b)。随后胚胎进一步发育, 假胚孔内的凹度也逐渐加大(图 2c), 胚胎整体开始由坐垫状收拢为圆球状。最后, 整个胚胎进入囊胚晚期, 假胚孔也随圆球状胚胎的形成而消失(图 2d)。

受精 15h 后, 胚胎进入原肠胚阶段, 原肠胚阶段可分为 4 个时期: 原肠早期、原肠中期、原肠晚期、

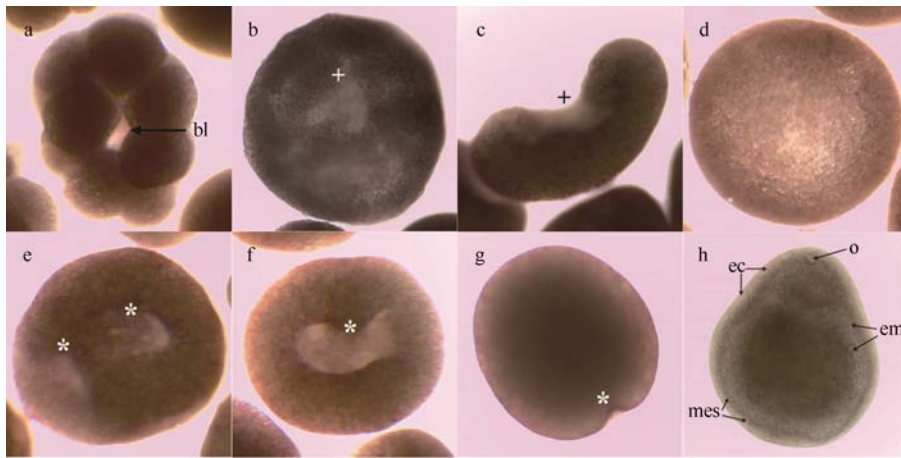


图2 肉质扁脑珊瑚早期发育形态图

a. 16细胞期, 分裂球呈不规则排列, 囊胚腔(bl)明显; b. 囊胚早期, 出现假胚孔(用+号对其和后续图片进行标记); c. 囊胚中期, 胚胎呈坐垫状; d. 囊胚晚期, 胚胎恢复成圆球状, 假胚孔逐渐消失; e. 原肠早期, 在胚体表面形成两个胚孔(用\*号对其和后续图片进行标记); f. 进一步发育, 两个胚孔扩大并融合成一个胚孔; g. 原肠晚期, 胚胎开始拉长, 胚孔接近封闭; h. 浮浪幼虫阶段, 原口(o)、外胚层(ec)、中胶层(mes)、内胚层(em)等结构分化明显

Fig. 2 Morphology of early development of *P. carnosus*.

a) The 16-cell stage, cell divisions did not appear particularly orderly, and a blastocoel (bl) became apparent; b) Early blastula stage: a pseudo-blastopore was formed. It is marked by a "+" in this and subsequent panels; c) Middle blastula stage: the embryo had a cushion shape; d) Later blastula stage: the embryo resumed a spherical shape, and the pseudo-blastopore gradually disappeared; e) Early gastrula stage: two separate pores appeared at the surface of the embryo. They are marked by asterisks in this and subsequent panels; f) At a slightly older stage, two pores expanded and grew together until ultimately a single blastopore was formed; g) The end of gastrula stage: the embryo slightly elongated, and closure of the blastopore was nearly completed; h) Planula phase stage: there was differentiated ectoderm (ec) on the outside of the larva, separated from the internal endoderm (en) by a thin layer of mesogloea (mes).

原肠末期。原肠早期时, 球状胚胎表面开始内陷, 在极短的时间内形成两个内陷的开孔(图2e), 随后开孔继续扩大并最终融合成一个开孔, 形成了真正的胚孔结构(图2f)。此时内陷进去的一层细胞逐渐分化为内胚层细胞, 内胚层细胞和脂质填满原囊胚腔空间。石珊瑚的中胶层也在此阶段产生。随着进一步发育, 胚孔开始闭合收缩, 形成原口, 而胚胎也开始拉长, 进入原肠中期。而后, 原口结构逐渐闭合, 胚胎形状继续拉长, 部分原肠胚体已呈椭圆状或梨状, 进入原肠晚期(图2g)。受精48h后, 胚胎完成了原口封闭, 这也标志着珊瑚胚胎发育的结束, 肉质扁脑珊瑚的早期发育正式进入浮浪幼虫阶段。

浮浪幼虫也可分为4个时期: 浮浪幼虫早期、浮浪幼虫中期、浮浪幼虫晚期, 浮浪幼虫末期。在浮浪幼虫早期, 幼虫的形态维持在椭圆状或拉梨状, 此时外胚层已发育出鞭毛结构, 具备游泳能力。随着发育的进行, 浮浪幼虫的形态更为明显, 幼虫形态拉长为圆柱状, 在显微镜下可清晰的观察到胚体两个胚层和中胶层(图2h)。从中期开始, 浮浪幼虫开始四处游动, 到晚期和末期, 内胚层的肠系膜形成, 游动能力逐渐增强。进入末期时, 浮浪幼虫已经开始在实验容器内寻找基底并尝试附着。

### 3 讨论

刺胞动物(Cnidaria)在过去也称为腔肠动物(Coelenterata), 是一类较为原始的多细胞动物, 在动物进化史上占有重要的位置, 是真正后生动物的开始, 代表了动物系统发展的一个重要特征(刘凌云等, 2009)。刺胞动物都存在有性繁殖和无性繁殖两种形式, 其中有性繁殖过程中都有一个共同的特点: 早期发育过程都需要经历浮浪幼虫这个特殊阶段。然而不同纲之间的物种有性繁殖过程又各有不同。例如水螅纲(Hydrozoa)水螅型的生殖细胞来自于其外胚层, 而珊瑚纲(Anthozoa)水螅型(包括石珊瑚)的生殖细胞来自于内胚层(龚启祥, 1991)。而在一开始卵裂时, 水螅纲和珊瑚纲都进行完全均等卵裂, 随着发育的进行, 水螅纲以分层法形成实心的原肠胚(Goldstein et al, 1997); 而珊瑚纲则在16细胞后分裂出不规则分布的分裂球, 经历了独特的虾片状或坐垫状阶段, 最后通过细胞内移形成两个胚层的原肠胚(Ball et al, 2002; Kraus et al, 2006)。许多学者认为这些差异是由于受精卵卵黄的大小和分布造成的结果, 也从侧面体现出珊瑚纲物种在系统进化上要高于水螅纲物种(龚启祥, 1991)。此次观察的肉质扁脑珊瑚早期发育过程和特征与珊瑚纲生物基本吻合。

石珊瑚有性繁殖的研究是石珊瑚种质保护和生态修复的基础, 20 世纪初以来, 国外许多学者就对石珊瑚的有性繁殖过程、有性繁殖模式和有性繁殖条件等方面进行了广泛深入的研究。石珊瑚的有性繁殖模式可分为 4 大类别: 雌雄同体排卵型、雌雄同体排幼型、雌雄异体排卵型和雌雄异体排幼型 (Baird et al, 2009)。Baird 等(2009)统计了 400 种石珊瑚的有性繁殖模式, 其中排卵类型占了 84.5%, 而雌雄同体类型占 68.9%。扁脑珊瑚属的琉球扁脑珊瑚 *P. ryukyunensis* (Babcock et al, 1986a)、中华扁脑珊瑚 *P. sinensis* (Babcock et al, 1986a)、精巧扁脑珊瑚 *P. daedalea* (Howells et al, 2014)、小脑纹珊瑚 *P. pini* (Guest et al, 2012)、片脑纹珊瑚 *P. lamellina* (Shlesinger et al, 1991) 等有性繁殖模式和繁殖过程已经有相关的研究报道, 这些研究中的扁脑珊瑚均为雌雄同体的排卵型珊瑚。同时这些研究都指出了扁脑珊瑚属的珊瑚排卵受季节、水温、纬度、月相、潮汐多方面因素影响, 存在一定差异。纬度影响是众多因素中最主要的方面, 例如新加坡附近低纬度海域的小脑纹珊瑚每年在 4 月份和 11 月份都能排卵进行有性繁殖 (Babcock et al, 1986a), 而北半球较高纬度的阿拉伯海域的精巧扁脑珊瑚排卵进行有性生殖的时间在 4、5 月 (Howells et al, 2014), 南半球的澳大利亚大堡礁附近海域的扁脑珊瑚属排卵时间都集中在 11 月 (Babcock et al, 1986a)。但至今国内外还没有相关肉质扁脑珊瑚的有性繁殖方面的报道。本研究的肉质扁脑珊瑚与同属的其他珊瑚一样均为雌雄同体排卵型珊瑚, 属于北缘石珊瑚品种, 排卵时间在五月中旬, 与国内外报道的北缘石珊瑚的排卵时间大体相同。

20 世纪 90 年代, Romano 等(1996)在应用分子手段对 34 种石珊瑚的系统进化关系进行研究的过程中, 发现现存的石珊瑚在 200 万年前已经分化为两大分支类群, 分别为坚实型类群和复合型类群。结合已有的形态学研究, Romano 等(1996)认为坚实型珊瑚骨骼钙化程度较高, 具有坚实的骨骼结构, 珊瑚外观主要以碟片状和团块状为主, 其代表种类包括蜂巢珊瑚科、石芝珊瑚科、褶叶珊瑚科等。复合型珊瑚骨骼钙化程度较低, 具有较为复杂多变的生长形态, 其代表种类包括鹿角珊瑚科、菌珊瑚科、木珊瑚科、滨珊瑚科等。近年来, 许多学者根据这个假说对两类石珊瑚的众多方面进行比较研究, 其

中就有这两类石珊瑚早期发育对比的报道 (Marlow et al, 2007; Okubo et al, 2013)。这些研究报道认为坚实型珊瑚和复合型珊瑚的胚胎发育过程存在一个很大区别, 在原肠胚形成之前, 坚实型珊瑚会经历一个存在囊胚腔的坐垫状时期, 同时在这个过程中胚胎内陷形成一个“假胚孔”, 但“假胚孔”会在原肠胚形成之前消失。真正的胚孔会在原肠胚表面随机的位置出现并最终发育成原口。复合型珊瑚则会经历一个没有囊胚腔的虾片状时期, 随着虾片状胚胎收拢形成一个碗状胚胎, 碗口位置会渐渐收缩直到原肠胚期演变成胚孔。此次观察到的肉质扁脑珊瑚胚胎发育过程属于典型坚实型珊瑚胚胎发育类型, 在卵裂、囊胚甚至到原肠形成初期都存在囊胚腔结构 (根据胚胎中央透光的程度判断), 同时囊胚期存在假胚孔结构。肉质扁脑珊瑚胚孔形成也较为特殊, 原肠初期时胚胎表面会迅速形成两个内陷的胚孔, 而后两个胚孔进一步扩大并最终融合成一个胚孔, 而 Okubo 等(2013)报道的其他坚实型珊瑚则未出现两个胚孔同时出现的现象。

早在 20 世纪 80 年代, Babcock 等(1986b)就首次对扁脑珊瑚属的胚胎发育进行观察和描述, 在观察中华扁脑珊瑚囊胚切片过程中, 发现了囊胚腔的存在, 但由于受当时石珊瑚胚胎发育的理论认识所限, 没有较为系统地地区分中华扁脑珊瑚与其他几种珊瑚尤其是复合型珊瑚胚胎发育的不同, 同时也未对后期发育中胚孔的出现与演化进行较为详细的描述。Okubo 等(2013)则对扁脑珊瑚属的 *Platygyra contorta* 的胚胎发育过程进行了详细的描述, 与本研究的肉质扁脑珊瑚具有极其类似的发育过程。目前, 国内外对石珊瑚早期发育研究较多, 主要集中于复合型珊瑚的品种, 尤其以鹿角珊瑚科的品种居多。这两大类别珊瑚的发育过程虽然有不同的地方, 但往往由于其较为相似的形态结构很难直观区别出来, 这也导致了较早之前对坚实型珊瑚研究报道的不准确。然而, 在 Okubo 等(2013)的研究中, 属于复合型珊瑚类群的十字牡丹珊瑚则出现了较为特别的胚胎发育情况, 其发育过程更类似于典型的坚实型珊瑚。这个现象表明石珊瑚早期发育模式没有绝对定性, 而目前国内外研究报道中对其内在发育机制仍未研究清楚, 对石珊瑚的早期发育系统研究还需更大量品种的观察和更深入的后续研究。

## 参考文献 References

龚启祥, 1991. 腔肠动物的生殖生物学[J]. 浙江水产学院学报, 10(1): 52–60. GONG QIXIANG, 1991. Reproductive biology

of Coelenterate[J]. Journal of Zhejiang College of Fisheries, 10(1): 52–60 (in Chinese).

- 黄晖, 张浴阳, 练健生, 等, 2011. 徐闻西岸造礁石珊瑚的组成及空间分布[J]. 生物多样性, 19(5): 505–510. HUANG HUI, ZHANG YUYANG, LIAN JIANSHEG, et al, 2011. Structure and diversity of scleractinia coral communities along the west seashore of Xuwen County[J]. Biodiversity Science, 19(5): 505–510 (in Chinese with English abstract).
- 黄洁英, 黄晖, 张浴阳, 等, 2011. 膨胀蔷薇珊瑚与壮实鹿角珊瑚的胚胎和幼虫发育[J]. 热带海洋学报, 30(2): 67–73. HUANG JIEYING, HUANG HUI, ZHANG YUYANG, et al, 2011. Embryonic and larval development of *Montipora turgescens* and *Acropora robusta*[J]. Journal of Tropical Oceanography, 30(2): 67–73 (in Chinese with English abstract).
- 李元超, 黄晖, 董志军, 等, 2009. 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, 28(1): 56–60. LI YUANCHAO, HUANG HUI, DONG ZHIJUN, et al, 2009. A histological analysis on oocyte development of *Acropora pulchra* in Sanya of Hainan Island[J]. Journal of Tropical Oceanography, 28(1): 56–60 (in Chinese with English abstract).
- 廖宝林, 刘丽, 刘楚吾, 2011. 徐闻珊瑚礁的研究现状与前景展望[J]. 广东海洋大学学报, 31(4): 91–96.
- 刘凌云, 郑光美, 2009. 普通动物学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社: 89–111.
- 张诗泽, 黄晖, 张浴阳, 等, 2016. 鹿回头多孔鹿角珊瑚与丛生盔形珊瑚性腺组织学研究[J]. 生态科学, 35(1): 41–46. ZHANG SHIZE, HUANG HUI, ZHANG YUYANG, et al, 2016. Histological analyses of the gonad for *Acropora millepora* and *Galaxea fascicularis* from Sanya Luhuitou of Hainan Island[J]. Ecological Science, 35(1): 41–46 (in Chinese with English abstract).
- 朱潜, 孙杨, 肖业有, 等, 2014. 风信子鹿角珊瑚的胚胎和幼虫发育研究[J]. 大连海洋大学学报, 29(5): 444–448. ZHU QIAN, SUN YANG, XIAO YEYOU, et al, 2014. Embryonic and larval development of coral *Acropora hyacinthus*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 29(5): 444–448 (in Chinese with English abstract).
- 邹仁林, 2001. 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.
- BABCOCK R C, BULL G D, HARRISON P L, et al, 1986a. Synchronous spawnings of 105 scleractinian coral species on the Great Barrier Reef[J]. Marine Biology, 90(3): 379–394.
- BABCOCK R C, HEYWARD A J, 1986b. Larval development of certain gamete-spawning scleractinian corals[J]. Coral Reefs, 5(3): 111–116.
- BAIRD A H, GUEST J R, WILLIS B L, 2009. Systematic and biogeographical patterns in the reproductive biology of scleractinian corals[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 40(1): 551–571.
- BALL E E, HAYWARD D C, REECE-HOYES J S, et al, 2002. Coral development: from classical embryology to molecular control[J]. International Journal of Developmental Biology, 46(4): 671–678.
- CHIU J M Y, LI S, LI A, et al, 2012. Bacteria associated with skeletal tissue growth anomalies in the coral *Platygyra carnosus*[J]. FEMS Microbiology Ecology, 79(2): 380–391.
- FADLALLAH Y H, 1983. Sexual reproduction, development and larval biology in scleractinian corals[J]. Coral Reefs, 2(3): 129–150.
- GOLDSTEIN B, FREEMAN G, 1997. Axis specification in animal development[J]. BioEssays, 19(2): 105–116.
- GOMEZ E D, YAP H T, CABAITAN P C, et al, 2011. Successful transplantation of a fragmenting coral, *Montipora digitata*, for reef rehabilitation[J]. Coastal Management, 39(5): 556–574.
- GUEST J R, CHOU L M, GOH B, 2012. Reproductive seasonality of the reef building coral *Platygyra Pini* on Singapore's reefs[J]. The Raffles Bulletin of Zoology, Supplement 25: 123–131.
- GUEST J R, HEYWARD A, OMORI M, et al, 2010. Rearing coral larvae for reef rehabilitation[M]//EDWARDS A J. Reef Rehabilitation Manual. St. Lucia: The Coral Reef Targeted Research and Capacity Building for Management Program: 73–92.
- HOWELLS E J, ABREGO D, VAUGHAN G O, et al, 2014. Coral spawning in the Gulf of Oman and relationship to latitudinal variation in spawning season in the northwest Indian Ocean[J]. Scientific Reports, 4: 7484.
- KRAUS Y, TECHNAU U, 2006. Gastrulation in the sea anemone *Nematostella vectensis* occurs by invagination and immigration: an ultrastructural study[J]. Development Genes and Evolution, 216(3): 119–132.
- MARLOW H Q, MARTINDALE M Q, 2007. Embryonic development in two species of scleractinian coral embryos: *Symbiodinium* localization and mode of gastrulation[J]. Evolution & Development, 9(4): 355–367.
- OKUBO N, MEZAKI T, NOZAWA Y, et al, 2013. Comparative embryology of eleven species of stony corals (Scleractinia)[J]. PLoS One, 8(12): e84115.
- RICHMOND R H, HUNTER C L, 1990. Reproduction and recruitment of corals: comparisons among the Caribbean, the Tropical Pacific, and the Red Sea[J]. Marine Ecology Progress Series, 60: 185–203.
- ROMANO S L, PALUMBI S R, 1996. Evolution of scleractinian corals inferred from molecular systematics[J]. Science, 271(5249): 640–642.
- SHLESINGER Y, LOYA Y, 1991. Larval development and survivorship in the corals *Favia fava* and *Platygyra lamellina*[J]. Hydrobiologia, 216–217(1): 101–108.
- SUN JIN, CHEN QIAN, LUN J C Y, et al, 2013. PcamBase: Development of a transcriptomic database for the brain coral *Platygyra carnosus*[J]. Marine Biotechnology, 15(2): 244–251.
- VAN TREECK P, SCHUHMACHER H, 1997. Initial survival of coral nubbins transplanted by a new coral transplantation technology-options for reef rehabilitation[J]. Marine Ecology Progress Series, 150: 287–292.
- WANG MINGLING, SUN JIN, LI JIAQI, et al, 2013. Complete mitochondrial genome of the brain coral *Platygyra carnosus*[J]. Mitochondrial DNA, 24(3): 194–195.