

韦芬, 崔梦瑶, 余克服, 等. 涠洲岛海域美丽鹿角珊瑚和秘密角蜂巢珊瑚的性腺发育研究[J]. 海洋学报, 2023, 45(12): 92–100, doi:10.12284/hyxb2023177

Wei Fen, Cui Mengyao, Yu Kefu, et al. Gonadal development of *Acropora formosa* and *Favites abdita* in Weizhou Island[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(12): 92–100, doi:10.12284/hyxb2023177

涠洲岛海域美丽鹿角珊瑚和秘密角蜂巢珊瑚的性腺发育研究

韦芬¹, 崔梦瑶^{1,2}, 余克服^{1,3*}, 黄雯¹, 张媛媛¹, 曾心茹¹, 魏鹏辉¹, 潘晓媛^{1,2}

(1. 广西大学海洋学院/广西大学珊瑚礁研究中心/广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 广西南宁 530004; 2. 广西大学资源环境与材料学院, 广西南宁 530004; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东广州 511458)

摘要: 性腺发育是造礁珊瑚有性繁殖的重要过程, 珊瑚会在性腺发育成熟后待环境适宜时进行大规模排卵。了解造礁珊瑚的性腺发育过程对预测其排卵时间具有重要的意义, 但目前尚未有关于涠洲岛海域造礁珊瑚性腺发育的报道, 且该海域造礁珊瑚的排卵时间也不明确。因此, 本文于 2021 年 9 月至 2022 年 5 月, 以涠洲岛海域的美丽鹿角珊瑚 (*Acropora formosa*) 和秘密角蜂巢珊瑚 (*Favites abdita*) 为研究对象, 观察其在自然海域的性腺发育过程及排卵时间。结果显示, 在自然海域美丽鹿角珊瑚的卵母细胞从 9 月开始发育, 约经 9 个月发育成熟, 精巢从 11 月开始发育, 经 2~3 个月成熟; 秘密角蜂巢珊瑚的卵母细胞在 10–11 月间开始发育, 经 7~8 个月发育成熟, 精巢发育周期为 1~2 个月; 2 种珊瑚的配子均在 2022 年 5 月份同步成熟, 并于 2022 年 5 月 19–22 日 (农历四月十九至二十二日) 间观察到了室内 2 种珊瑚的排卵行为, 与其在自然海域的排卵时间基本一致。基于上述证据, 本文推测涠洲岛海域美丽鹿角珊瑚和秘密角蜂巢珊瑚主要的排卵时间在农历四月十五日前后。本研究为涠洲岛造礁珊瑚的繁殖生物学提供了宝贵的信息, 为进一步利用其有性繁殖进行珊瑚礁的生态修复等提供了理论依据。

关键词: 造礁珊瑚; 排卵时间; 性腺; 组织学; 有性繁殖; 涠洲岛

中图分类号: P735

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)12-0092-09

1 引言

造礁珊瑚作为珊瑚礁生态系统的主要构建者, 通过有性繁殖和无性繁殖维持珊瑚礁生态系统的稳定性^[1]。有性繁殖方式分为雌雄同体排卵型、雌雄同体排幼型、雌雄异体排卵型和雌雄异体排幼型, 这 4 种方式均可通过雌雄配子结合产生带有新基因型的新生个体^[2-3]。在已知的造礁珊瑚中, 约 65% 为雌雄同体排卵型珊瑚^[4-5]。

造礁珊瑚没有真正的器官, 通常将其配子发育的位置称为性腺^[6]。性腺发育是造礁珊瑚有性繁殖活动中的基础环节^[7-8], 不同种间性腺发育时间不同, 目前已知的排卵型珊瑚的性腺发育周期多为 1 年, 其中, 大部分珊瑚的卵母细胞发育周期为 4~12 个月, 精巢为 1~8 个月^[9]; 也有些卵母细胞需要 14~15 个月才能发育成熟, 不同年份配子发育周期重叠, 或一年中有多个配子发育周期^[8]。同种造礁珊瑚在不同地区的配子发育时间也存在差异^[8, 10], 如红海亚喀巴湾

收稿日期: 2023-04-20; 修订日期: 2023-11-01。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42090041, 42030502); 广西自然科学基金项目(AA17204074, AD17129063, 2023GXNSFAA02651); 广西南海珊瑚礁研究重点实验室自主基金资助(GXLSCRSCS2023103)。

作者简介: 韦芬(1986—), 女, 广西壮族自治区融安县人, 博士, 主要从事珊瑚礁的生态与修复相关研究。E-mail: weifensky@163.com

* 通信作者: 余克服, 男, 教授, 主要从事南海珊瑚礁地质、生态与环境研究。E-mail: kefuyu@scsio.ac.cn

(29°N)的网状菊花珊瑚(*Goniastrea retiformis*)、片扁脑珊瑚(*Platygyra lamellina*)及疣状杯形珊瑚(*Pocillopora verrucosa*)的性腺发育周期明显比其他低纬度地区(25°~17°N)长1~4个月^[10],但也有研究表明澳大利亚不同纬度珊瑚的性腺发育周期基本一致^[11]。因此,通过对造礁珊瑚性腺进行组织学分析,了解其配子发育特征和周期,推断该海域珊瑚大致的排卵时间,将有助于评估当地珊瑚的繁殖过程、种群补充能力和生态恢复能力,进而为珊瑚礁生态系统的保护提供重要的科学依据。

自20世纪80年代开始,国外学者对造礁珊瑚的性腺发育做了大量的记录和报道,Szmant-Froelich等^[12]1980年首次将性腺发育划分为5个时相;Glynn等^[13]在1991年将珊瑚的性腺发育划分为4个时相,并发现温度会影响东太平洋2种杯形珊瑚(*Pocillopora damicornis*、*Pocillopora elegans*)的配子发育时间;Gilmour等^[14]通过组织学分析发现澳大利亚斯科特礁(Scott Reef)的鹿角珊瑚在每年的春季及秋季均能发生排卵行为,且主要的排卵季节为秋季;此外,日本、新加坡、加勒比海及肯尼亚等地都有研究人员报道了造礁珊瑚的性腺发育过程^[3,15-17]。

我国关于造礁珊瑚性腺发育的研究较少。2009年李元超等^[18]通过组织学分析了三亚鹿回头海域佳丽鹿角珊瑚(*Acropora pulchra*)的卵母细胞发育情况,从而判断了这种珊瑚的排卵时间为4月底至5月初;随后,2016年张诗泽等^[19]也观察了该海域的多孔鹿角珊瑚(*Acropora millepora*)与丛生盔形珊瑚(*Galaxea fascicularis*)的性腺发育特征,指出多孔鹿角珊瑚与丛生盔形珊瑚分别为雌雄同体型珊瑚、假雌全异株型珊瑚;杨小东^[20]和金磊^[21]分别于2013年、2014年对徐闻珊瑚礁区的澄黄滨珊瑚(*Porites lutea*)、大管孔珊瑚(*Goniopora djiboutiensis*)、丛生盔形珊瑚、盾形陀螺珊瑚(*Turbinaria peltata*)和稀杯盔形珊瑚(*Galaxea astreata*)的性腺发育过程进行了研究,推测徐闻珊瑚礁区珊瑚的排卵时间主要在4~7月;Chen等^[22]通过对造礁珊瑚性腺发育的研究,指出其在台湾北部的排卵时间主要为8月。

位于热带北缘的涠洲岛纬度相对偏高,具有在全球气候变暖背景下成为南海珊瑚避难所的潜力^[23-24],认识该海域造礁珊瑚的性腺发育特征和排卵时间对于科学保护这里的珊瑚礁生态系统具有重要的意义,但尚未有相关研究的报道。本研究于2021年9月至2022年5月间,选取涠洲岛海域的美丽鹿角珊瑚(*Acropora formosa*)和秘密角蜂巢珊瑚(*Favites abdita*)为

代表,调查其性腺发育过程,预测其排卵时间。其中,美丽鹿角珊瑚具有成活率高、生长速度快的优势^[25],是涠洲岛进行人工珊瑚礁生态修复的首选属种之一,目前已知的鹿角珊瑚均为雌雄同体排卵型珊瑚^[3,26],但迄今还没有关于美丽鹿角珊瑚性腺发育过程的报道;涠洲岛海域的秘密角蜂巢珊瑚(属于裸肋珊瑚科)的重要值百分比为2.74%^[27],Kojis和Quinn^[28]、Maboloc等^[29]分别报道了大堡礁及菲律宾西北部秘密角蜂巢珊瑚的性腺发育过程,发现两地的秘密角蜂巢珊瑚均为雌雄同体排卵型珊瑚,但性腺发育周期存在差异;国内尚未见关于该种珊瑚性腺发育的报道。

2 材料与方法

2021年9月至2022年5月,在北海涠洲岛海域(21°00'~21°10'N, 109°00'~109°15'E)2~5 m处采集美丽鹿角珊瑚及秘密角蜂巢珊瑚,由于大部分造礁珊瑚的性腺在秋季或冬季开始发育,到春季海温上升后发育速度加快^[30],因此在性腺发育较慢的9月至翌年2月每两个月取样一次,性腺发育较快的3~5月每个月取样1~2次。每次每种珊瑚各采集5株,单体直径(丛径)均大于20 cm。美丽鹿角珊瑚和秘密角蜂巢珊瑚取样位置分别位于顶端下方和边缘约5 cm处,取样大小均为1~3 cm。

不同时间采集的样本按以下流程进行处理:用5%海水多聚甲醛溶液固定,50%甲酸脱钙5 d,经浓度为75%乙醇、85%乙醇、90%乙醇、95%乙醇及无水乙醇溶液从低到高逐级脱水,二甲苯将性腺透明化后用54℃石蜡包埋,制成6 μm的连续切片,再用浓度从高到低的乙醇溶液逐级水化,经HE染色,凝胶树脂封片,在Olympus CX23显微镜下观察、拍照,同时随机选取30~50个卵母细胞,测量其最大直径,并用SPSS 26.0计算平均直径及标准差。

除了在自然海域进行造礁珊瑚的采集、观察以外,还于2022年4月28日将6株美丽鹿角珊瑚和4株秘密角蜂巢珊瑚运回涠洲岛珊瑚馆的养殖缸内进行养殖。该养殖缸采用的是天然海水,海水的循环系统由沉淀过滤池、冷水机、海藻池及蛋白质分离器等组成,每周换水一次。水温保持在(26±1)℃,采用自然光照,每天喂食少量卤虫。同时,每隔数日截取一小块断面,在Olympus SZX7显微镜下拍照,通过卵子颜色判断性腺是否成熟,若已经成熟,则于每日18:00~24:00密切观察室内珊瑚是否出现排卵现象,同时通过水肺潜水监测海区珊瑚的排卵行为,发现排卵后用Olympus TG6相机记录。用塑料烧杯

在室内收集卵包, 在 Olympus SZX7 显微镜下拍照观察。

3 结果

本研究将造礁珊瑚性腺发育的过程划分为 4 个时期, 具体的形态特征如表 1、图 1 和图 2 所示。

3.1 美丽鹿角珊瑚的性腺发育过程

2021 年 9 月 28 日, 美丽鹿角珊瑚的肠系膜内有直径不均匀、形状不规则的 I 时相卵母细胞(图 1a), 又称卵原细胞, 卵母细胞边缘粗糙, 细胞质质密, 细胞核位于卵母细胞中央, 核质比较高, 且部分细胞核的核膜不清晰。卵母细胞平均直径为 $(61.64 \pm 13.02) \mu\text{m}$ 。

2021 年 11 月 18 日, 卵母细胞处于第 II 时相, 细胞体积迅速增大, 平均直径为 $(118.81 \pm 32.60) \mu\text{m}$, 细胞呈圆形, 胞质内有大量脂质泡, 细胞核核膜清晰, 形状不规则(图 1b)。

2022 年 3 月 8 日, 观察到第 III 时相卵母细胞及第 I 时相精巢分别在不同的肠系膜中发育(图 1c1)。第 III 时相卵母细胞多呈椭圆形, 平均直径为 $(219.63 \pm 38.43) \mu\text{m}$, 脂质泡内出现卵黄颗粒, 部分细胞的细胞核向细胞膜偏移(图 1c2)。此时精巢处于第 I 时相, 几十个精原细胞成簇地聚集在一起, 中胶层还不明显(图 1c3)。

2022 年 4 月 28 日, 卵母细胞仍处于第 III 时相, 平均直径为 $(390.38 \pm 55.13) \mu\text{m}$ (图 1d1), 精巢为第 II 时相, 精巢被较厚的中胶层隔开, 生殖细胞数量增多, 排列紧密, 主要为精母细胞(图 1d2)。

2022 年 5 月 8 日, 卵母细胞为第 IV 时相, 细胞间

紧密粘连, 细胞膜表面出现不规则凹陷, 细胞质内可观察到许多细小的卵黄颗粒, 细胞核多偏移至细胞膜处, 直径为 $(417.89 \pm 75.91) \mu\text{m}$ (图 1e1)。此时, 大部分精巢处于第 III 时相, 中间有腔隙, 细胞数量明显增多, 排列疏松, 多为精细胞(图 1e2)。

2022 年 5 月 18 日, 卵母细胞与精巢同步发育至第 IV 时相, 此时的精巢中含有大量排列紧密的精子, 明显观察到精子尾部汇聚于一侧(图 1f1)。光学显微镜下可观察到卵母细胞为淡黄色、精巢白色条状(图 1f2)。

2022 年 5 月 19 日 20:10, 室内养殖缸观察到美丽鹿角珊瑚排卵, 大量包含卵子和精子的卵包从水螅体口部挤出, 排出的卵包浮到水面后散开(图 1g1、图 1g2), 整个排卵过程约 30 min, 持续 4 d(5 月 19 日至 5 月 22 日)。自然海区的美丽鹿角珊瑚在 5 月 21 日和 22 日排卵(图 1g3), 室内排卵时间与海区同步。

2022 年 5 月 25 日未观察到卵母细胞和精子(图 1h), 表明美丽鹿角珊瑚的排卵过程已经结束。

3.2 秘密角蜂巢珊瑚的性腺发育过程

2021 年 9 月 28 日秘密角蜂巢珊瑚肠系膜的中胶层中未发现可识别的生殖细胞(图 2a), 表明此时的性腺尚未开始发育。

2021 年 11 月 18 日, 大部分卵母细胞已经进入第 II 时相, 平均直径为 $(86.72 \pm 32.57) \mu\text{m}$, 此时细胞呈梭形, 细胞质中有大量未着色的脂质泡(图 2b1), 同时, 性腺内还有少量处于第 I 时相的卵母细胞, 细胞核核膜不清晰(图 2b2)。

表 1 不同时期造礁珊瑚配子的主要形态特征

Table 1 Morphological characteristics of different gonadal stages in scleractinian corals

配子类型	时期	主要形态特征	图示	
			美丽鹿角珊瑚	秘密角蜂巢珊瑚
卵母细胞	I 时相	细胞质质密, 核质比较高, 核膜不清晰	图1a	图2b2
	II 时相	卵母细胞内出现脂质泡, 形状不规则	图1b	图2b1
	III 时相	出现卵黄颗粒, 细胞核向细胞一端迁移	图1c2、图1d1	图2c
	IV 时相	细胞间紧密黏连, 细胞膜表面不规则凹陷	图1e1	图2d2
精巢	I 时相	较薄的中胶层包裹着十几个精原细胞	图1c3	-
	II 时相	精母细胞排列紧密, 中胶层形成较厚的壁	图1d2	-
	III 时相	中胶层变薄, 精细胞排列疏松, 精巢内出现空腔	图1e2	图2d3
	IV 时相	精子紧密排列, 尾部汇聚于一侧	图1f1	图2d4

注: -表示无数据。

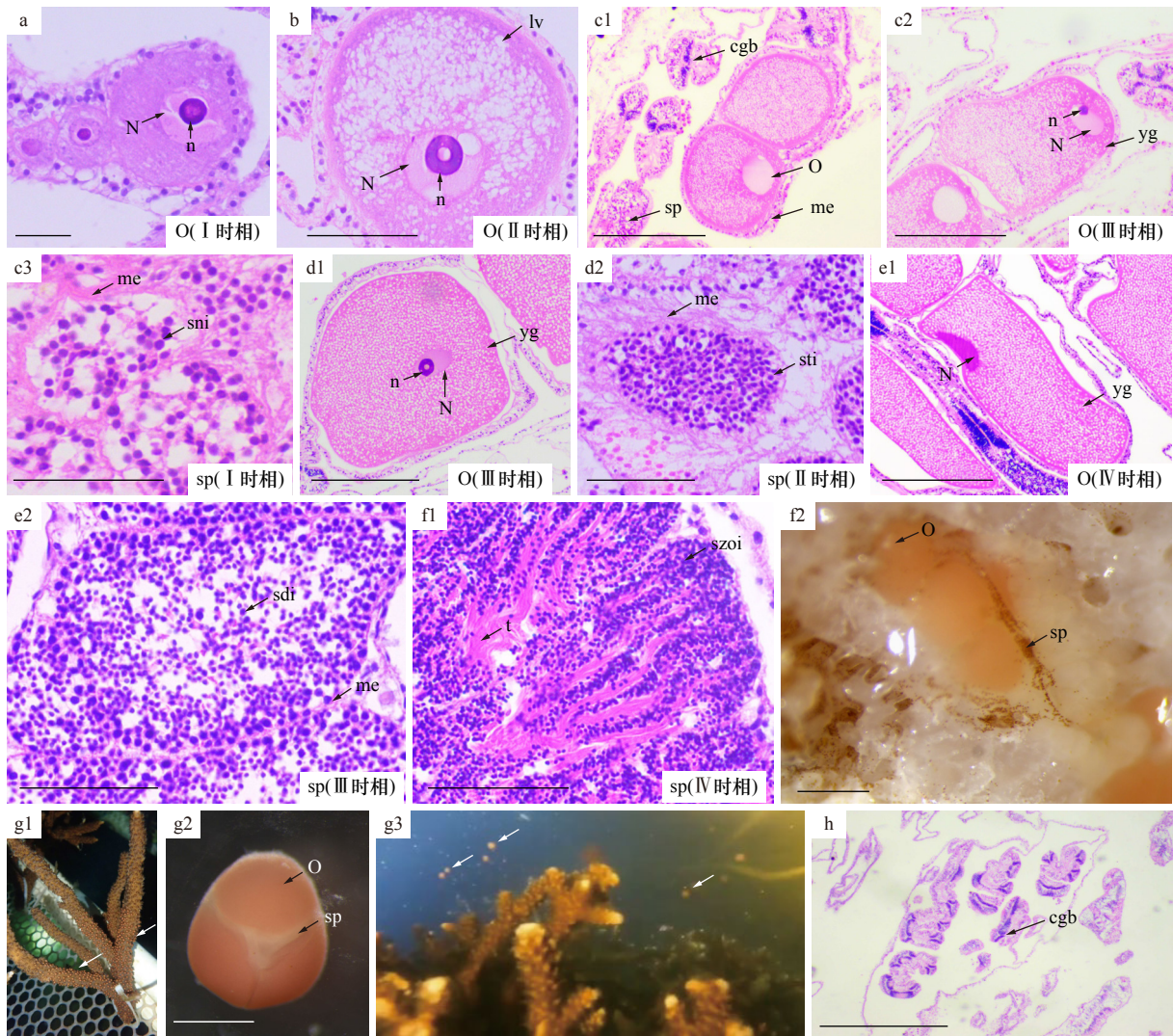


图1 美丽鹿角珊瑚的性腺发育过程及排卵行为

Fig. 1 Gonadal development and spawning of *Acropora formosa*

a. 第 I 时相卵母细胞 (2021 年 9 月 28 日); b. 第 II 时相卵母细胞 (2021 年 11 月 18 日); c1, c2, c3. 在不同肠系膜中发育的第 III 时相卵母细胞 (c1, c2) 和第 I 时相精巢 (c1, c3) (2022 年 3 月 8 日); d1, d2. 第 III 时相卵母细胞 (d1) 和第 II 时相精巢 (d2) (2022 年 4 月 28 日); e1, e2. 第 IV 时相卵母细胞 (e1) 和第 III 时相精巢 (e2) (2022 年 5 月 8 日); f1, f2. 第 IV 时相的精巢 (f1)、光学显微镜下发育成熟的性腺 (f2) (2022 年 5 月 18 日); g1, g2, g3. 养殖缸 (g1) 和海区 (g3) 正在排卵的美丽鹿角珊瑚、排出的卵包 (g2) (白色箭头所示为卵包) (2022 年 5 月 19 日至 22 日); h. 排卵后的性腺 (2022 年 5 月 25 日); O. 卵母细胞; N. 细胞核; n. 核仁; lv. 脂质泡; cgb. 刺丝囊; sp. 精巢; yg. 卵黄颗粒; sni. 精原细胞; me. 中胶层; sti. 精母细胞; sdi. 精细胞; szoi. 精子; t. 精子尾. 标尺如下: a, b, c3, d2, e2, f1 为 50 μm ; c1, c2, d1, e1 为 200 μm ; f2, g2, h 为 500 μm

a. Stage I oocyte (September 28, 2021); b. Stage II oocyte (November 18, 2021); c1, c2, c3. Stage III oocyte (c1, c2) and Stage I spermary (c1, c3) developing in different mesenteries (March 8, 2022); d1, d2. Stage III oocyte (d1) and Stage II spermary (d2) (April 28, 2022); e1, e2. Stage IV oocyte (e1) and Stage III spermary (e2) (May 8, 2022); f1, f2. Stage IV spermary (f1), mature gonads (f2) (May 18, 2022); g1, g2, g3. *A. formosa* were spawning in tank (g1) and in the wild (g3), egg-sperm bundle (g2) (egg-sperm bundles shown by the white arrow) (May 19–22, 2022); h. mesenteries after spawning (May 25, 2022); O. oocyte; N. nucleus; n. nucleolus; lv. lipid vesicle; cgb. cnidoglandular band; sp. spermary; yg. yolk granules; sni. spermatogonia; me. mesoglea; sti. spermatocyte; sdi. spermatid; szoi. spermatozoon; t. sperm tail. a, b, c3, d2, e2, f1: scales = 50 μm ; c1, c2, d1, e1: scales = 200 μm ; f2, g2, h: scales = 500 μm

2022 年 3 月 8 日, 卵母细胞处于第 III 时相, 细胞的直径显著增大, 平均为 $(175.58 \pm 45.96) \mu\text{m}$, 细胞核和核仁明显, 该阶段的脂质泡中含有卵黄颗粒 (图 2c)。

2022 年 5 月 8 日, 观察到秘密角蜂巢珊瑚的卵母细胞和精巢在同一个肠系膜中混合发育 (图 2d1)。

卵母细胞为第 IV 时相, 其形状不规则, 细胞核偏移到细胞膜处, 标志着卵母细胞已经发育到成熟的最后阶段, 平均直径为 $(320.24 \pm 65.74) \mu\text{m}$ (图 2d2)。此时, 小部分精巢仍处于第 III 时相, 可以观察到明显的空腔 (图 2d3), 但大部分精巢已发育至第 IV 时相, 可以观

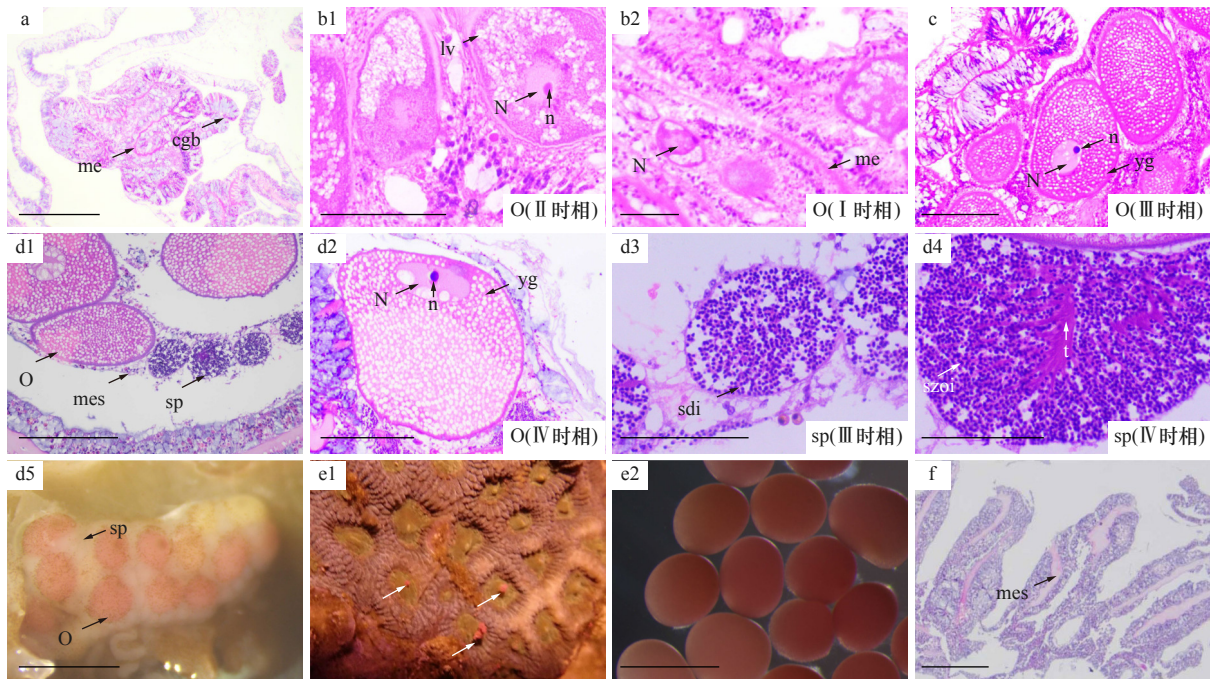


图 2 秘密角蜂巢珊瑚的性腺发育过程及排卵行为

Fig. 2 Gonadal development and spawning of *Favites abdita*

a. 性腺未发育(2021年9月28日); b1, b2. 第Ⅱ时相卵母细胞(b1)和第Ⅰ时相卵母细胞(b2)(2021年11月18日); c. 第Ⅲ时相卵母细胞(2022年3月8日); d1, d2, d3, d4, d5. 在同一肠系膜中发育的配子(d1), 第Ⅳ时相卵母细胞(d1, d2), 第Ⅲ、Ⅳ时相精巢(d3, d4)及光学显微镜下成熟的性腺(d5)(2022年5月8日); e1, e2. 养殖缸内正在排卵的秘密角蜂巢珊瑚(e1)(白色箭头所示为卵包)及卵母细胞(e2)(2022年5月22日); f. 排卵后的性腺(2022年5月25日); me. 中胶层; cgb. 刺丝囊; O. 卵母细胞; N. 细胞核; n. 核仁; lv. 脂质泡; yg. 卵黄颗粒; mes. 肠系膜; sp. 精巢; sdi. 精细胞; szoi. 精子; t. 精子尾. 标尺如下: b1, b2, d3, d4 为 50 μm; a, c, d1, d2 为 200 μm; d5, e2, f 为 500 μm

a. Undeveloped gonad (September 28, 2021); b1, b2. Stage II oocyte (b1) and Stage I oocyte (b2) (November 18, 2021); c. Stage III oocyte (March 8, 2022); d1, d2, d3, d4, d5. gametes developing in the same mesentery (d1), Stage IV oocyte (d1, d2), Stage III and IV spermatids (d3, d4), mature gonad (d5) (May 8, 2022); e1, e2. *F. abdita* were spawning in tank (e1) (egg-sperm bundles shown by the white arrow) and oocytes (e2) (May 22, 2022); f. mesenteries after spawning (May 25, 2022); me. mesoglea; cgb. cnidoglandular band; O. oocyte; N. nucleus; n. nucleolus; lv. lipid vesicle; yg. yolk granules; mes. mesentery; sp. spermatid; sdi. spermatid; szoi. spermatozoon; t. sperm tail. b1, b2, d3, d4: scales = 50 μm; a, c, d1, d2: scales = 200 μm; d5, e2, f: scales = 500 μm

观察到精子头部呈紫色, 精子尾被染成紫红色, 呈束状聚集于一处(图 2d4)。在显微镜下, 卵子呈粉红色, 精巢表现为围绕在卵母细胞旁边的白色组织(图 2d5), 至此配子已基本发育成熟。

2022年5月22日 21:40, 室内秘密角蜂巢珊瑚排卵, 可以观察到包含卵子及精子的红色卵包从口盘处排出(图 2e1), 卵包浮到水面后散开, 卵母细胞呈粉红色(图 2e2)。

2022年5月25日, 该种珊瑚中没有观察到配子, 表明秘密角蜂巢珊瑚排卵过程已经结束(图 2f)。

4 讨论

4.1 美丽鹿角珊瑚及秘密角蜂巢珊瑚的性腺发育特征

本研究选取的两种造礁珊瑚均为雌雄同体排卵型珊瑚, 此结果与已知鹿角属珊瑚及秘密角蜂巢珊瑚

的繁殖类型一致^[13, 28-29], 美丽鹿角珊瑚卵母细胞和精子在不同的肠系膜分别发育, 而秘密角蜂巢珊瑚的配子则在同一肠系膜混合发育。雌雄同体排卵型珊瑚的性腺有 3 种分布方式^[7], 即: 卵母细胞和精子在同一个水螅体的不同肠系膜上分别发育; 卵母细胞与精子在同一个肠系膜中混合发育; 以及二者在同一个肠系膜的不同位置分别独立发育。目前已知的鹿角珊瑚属的配子均在不同的肠系膜上独立发育^[26], 而混合发育模式则多见于裸肋科珊瑚^[29], 本研究的结果与上述文献报道的一致, 但是关于雌雄同体珊瑚性腺分布方式和性别决定机制的研究较少, 具体原因还有待进一步研究^[31]。

洲岛海域美丽鹿角珊瑚卵母细胞于 2021 年 9 月开始发育, 约经 9 个月发育成熟, 精巢在 11 月开始发育, 发育周期为 2~3 个月; 秘密角蜂巢珊瑚卵母细胞在 10-11 月之间开始发育, 发育成熟时间为

7~8个月,精巢的发育周期约为1~2个月。

这两种珊瑚在涠洲岛海域性腺成熟的时间比其他低纬度海域的珊瑚更长,如菲律宾(15°N)的多孔鹿角珊瑚(*A. millepora*)卵母细胞发育时间为8个月^[32],角蜂巢属珊瑚(*F. abdita*、*Favites colemani*)为6个月^[29];印度尼西亚海域(6°S)的矛枝鹿角珊瑚(*Acropora aspera*)卵母细胞在5~7个月内成熟^[33];而大堡礁(23°S)秘密角蜂巢珊瑚卵母细胞与涠洲岛的发育时间基本一致,均为7~8个月^[28]。不同海域造礁珊瑚的性腺发育周期存在差异,可能主要与海表温度有关^[8,10]。大堡礁和涠洲岛的月平均海温相似,约在20~30℃之间,而菲律宾、印度尼西亚海域的月平均海温较高,分别为26~31℃、29~31℃^[34]。Fan和Dai^[35]将台湾南部及北部的薄片刺孔珊瑚(*Echinopora lamellosa*)交互移植后,海水温度较高的南部海域珊瑚性腺发育周期更短。这些现象都表明较高的海水温度可以加快造礁珊瑚的性腺发育,原因可能是在海水温度较高的海域中,水体浮游生物含量比较多;此外适当高温也会加快珊瑚的代谢速率,有助于卵母细胞营养物质的快速积累,从而促进其快速生长^[36]。

4.2 涠洲岛海域美丽鹿角珊瑚和秘密角蜂巢珊瑚主要的排卵时间在农历四月十五日前后

本研究观察到涠洲岛珊瑚馆的美丽鹿角珊瑚排卵时间为2022年5月19~22日间(农历四月十九至二十二日,满月后4~7d),秘密角蜂巢珊瑚为5月22日(农历四月二十二日);自然海域美丽鹿角珊瑚排卵时间为5月21日和22日,与室内珊瑚排卵时间基本一致。此外,前期研究我们也通过组织切片发现2021年涠洲岛海域的秘密角蜂巢珊瑚及美丽鹿角珊瑚的性腺在农历四月十五日前排空;同时,本研究还统计了1991~2018年间中高纬度(20°~23°N)海域鹿角珊瑚科(37种115次排卵)和裸肋珊瑚科(3属16种121次排卵)的排卵时间^[37-38],发现其排卵时间也主要集中在农历三月十五日和农历四月十五日之后;考虑到涠洲岛海域的平均海温在4月下旬升到25℃^[23],因此推测这两种造礁珊瑚在涠洲岛海域的主要排卵时间在农历四月十五日前后。

现有研究表明,不同纬度造礁珊瑚的排卵时间存

在一定的差异,大部分珊瑚倾向于在当地的春季到夏末期间排卵^[39-41],具体排卵的月份主要由海表温度决定^[42-44],如Keith等^[43]发现太平洋34个海域鹿角属珊瑚(*Acropora* spp.)的排卵时间与多种环境因素有关,其中海表温度快速升高是促进鹿角珊瑚排卵的主要环境因子;黄洁英等^[44]也发现三亚鹿回头海域造礁石珊瑚的排卵时间与该海域海水温度上升的时段一致。

月相是影响造礁珊瑚具体排卵日期的主要因素,大部分珊瑚会在满月(农历十五日)前后发生排卵行为^[45-46]。现有研究表明珊瑚可以感受月光强度的变化,并借此调节排卵的具体日期^[47-49],如Lin等^[49]对不同遮光条件下裸肋珊瑚排卵行为进行研究,发现满月时日落与月出之间的黑暗环境会引发裸肋珊瑚的排卵,但也有研究报道将鹿角珊瑚长期置于黑暗环境会抑制其排卵^[50],原因还尚未清楚。此外,月相引起的潮汐变化,也被认为是影响造礁珊瑚排卵日期的环境因素之一^[39,51-52],Babcock等^[39]在1986年发现珊瑚在满月后的小潮大规模产卵,而Wolstenholme等^[52]通过分析日本高知岛及澳大利亚蜥蜴岛的大规模排卵行为也得出了相似的结论,并认为可能的原因是满月后的小潮产卵会增加配子浓度,提高受精率。因此,月相引起的月光强度及潮汐变化是影响造礁珊瑚排卵日期的重要因素。

5 结论

通过对2021年9月至2022年5月涠洲岛海域两种造礁珊瑚的性腺发育进行研究,结果发现两种珊瑚都是雌雄同体排卵型珊瑚,美丽鹿角珊瑚的卵母细胞约经过9个月发育成熟;秘密角蜂巢珊瑚的卵母细胞经7~8个月发育成熟,两种珊瑚的配子均在2022年5月同步成熟,并于5月下旬(农历四月十五日后)排卵,结合前期的研究,推测涠洲岛海域美丽鹿角珊瑚及秘密角蜂巢珊瑚主要的排卵时间在农历四月十五日前后。本研究首次记录了涠洲岛海域造礁珊瑚的性腺发育过程和排卵时间,为今后利用其有性繁殖进行生态修复提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Richmond R H. Reproduction and recruitment in corals: critical links in the persistence of reefs[M]//Birkeland C. Life and Death of Coral Reefs. New York: Chapman & Hall, 1997.
- [2] Szmant A M. Reproductive ecology of Caribbean reef corals[J]. *Coral Reefs*, 1986, 5(1): 43-53.
- [3] Baird A H, Guest J R, Willis B L. Systematic and biogeographical patterns in the reproductive biology of scleractinian corals[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, 40: 551-571.

- [4] Loya Y, Sakai K. Bidirectional sex change in mushroom stony corals[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 275(1649): 2335–2343.
- [5] Kersting D K, Casado C, López-Legentil S, et al. Unexpected patterns in the sexual reproduction of the Mediterranean scleractinian coral *Cladocora caespitosa*[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, 486: 165–171.
- [6] Goffredo S, Dubinsky Z. The Cnidaria, Past, Present and Future: The World of Medusa and Her Sisters[M]. Switzerland: Springer, 2016.
- [7] Harrison P L, Wallace C C. Reproduction, dispersal and recruitment of scleractinian corals[M]//Dubinsky Z. *Ecosystems of the World: Coral Reefs*. Amsterdam: Elsevier, 1990: 133–207.
- [8] Harrison P L. Sexual reproduction of scleractinian corals[M]//Dubinsky Z, Stambler N. *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*. Dordrecht: Springer, 2011: 59–85.
- [9] Fadlallah Y H. Sexual reproduction, development and larval biology in scleractinian corals: a review[J]. *Coral Reefs*, 1983, 2(3): 129–150.
- [10] Sawall Y, Al-Sofyani A. Biology of Red Sea corals: metabolism, reproduction, acclimatization, and adaptation[M]//Rasul N M A, Stewart I C F. *The Red Sea: The Formation, Morphology, Oceanography and Environment of a Young Ocean Basin*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015: 487–509.
- [11] Oliver J, Babcock R C, Harrison P L, et al. Geographic extent of mass coral spawning: clues to ultimate causal factors[C]//Proceedings of the Sixth International Coral Reef Symposium. Townsville: [s.n.], 1988: 803–810.
- [12] Szmant-Froelich A, Yevich P, Pilson M E Q. Gametogenesis and early development of the temperate coral *Astrangia danae* (Anthozoa: Scleractinia)[J]. *The Biological Bulletin*, 1980, 158(2): 257–269.
- [13] Glynn P W, Gassman N J, Eakin C M, et al. Reef coral reproduction in the eastern Pacific: Costa Rica, Panama, and Galapagos Islands (Ecuador) I. Pocilloporidae[J]. *Marine Biology*, 1991, 109(3): 355–368.
- [14] Gilmour J P, Underwood J N, Howells E J, et al. Biannual spawning and temporal reproductive isolation in *Acropora* corals[J]. *PLoS One*, 2016, 11(3): e0150916.
- [15] Nozawa Y, Tokeshi M, Nojima S. Reproduction and recruitment of scleractinian corals in a high-latitude coral community, Amakusa, southwestern Japan[J]. *Marine Biology*, 2006, 149(5): 1047–1058.
- [16] Soto D, Weil E. Sexual reproduction in the Caribbean coral genus *Isophyllia* (Scleractinia: Mussidae)[J]. *PeerJ*, 2016, 4: e2665.
- [17] Mangubhai S, Harrison P L. Gametogenesis, spawning and fecundity of *Platygyra daedalea* (Scleractinia) on equatorial reefs in Kenya[J]. *Coral Reefs*, 2008, 27(1): 117–122.
- [18] 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): 56–60.
Li Yuanchao, Huang Hui, Dong Zhijun, et al. A histological analysis on oocyte development of *Acropora pulchra* in Sanya of Hainan Island[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(1): 56–60.
- [19] 张诗泽, 黄晖, 张浴阳, 等. 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*, 2016, 35(1): 41–46.
Zhang Shize, Huang Hui, Zhang Yuyang, et al. Histological analyses of the gonad for *Acropora millepora* and *Galaxea fascicularis* from Sanya Luhuitou of Hainan Island[J]. *Ecological Science*, 2016, 35(1): 41–46.
- [20] 杨小东. 澄黄滨珊瑚、大管孔珊瑚和丛生盔形珊瑚性腺发育与生长规律的研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.
Yang Xiaodong. Study of gonad development and growths of *Porites lutea*, *Goniopora djiboutiensis* and *Galaxea fascicularis*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013.
- [21] 金磊. 盾形陀螺珊瑚和稀杯盔形珊瑚性腺发育与生长规律的研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2014.
Jin Lei. Study of gonad development and growths of *Turbinaria peltata* and *Galaxea astreata*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2014.
- [22] Chen C J, Chen W J, Chang C F. Multispecies spawning of scleractinian corals in nonreefal coral communities of northern Taiwan in the northwestern Pacific Ocean[J]. *Bulletin of Marine Science*, 2021, 97(2): 351–371.
- [23] 王文欢. 近 30 年来北部湾涠洲岛造礁石珊瑚群落演变及影响因素 [D]. 南宁: 广西大学, 2017.
Wang Wenhuan. Evolution and influential factors of coral community over past three decades in Weizhou Island reef, Beibu Gulf[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [24] Yu Wanjun, Wang Wenhuan, Yu Kefu, et al. Rapid decline of a relatively high latitude coral assemblage at Weizhou Island, northern South China Sea[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2019, 28(14): 3925–3949.
- [25] 王欣, 高霆炜, 陈骁, 等. 涠洲岛园艺式珊瑚苗圃的架设与移植 [J]. *广西科学*, 2017, 24(5): 462–467.
Wang Xin, Gao Tingwei, Chen Xiao, et al. The construction and transplantation of coral gardening nursery in Weizhou Island[J]. *Guangxi Sciences*, 2017, 24(5): 462–467.
- [26] Wallace C C. Reproduction, recruitment and fragmentation in nine sympatric species of the coral genus *Acropora*[J]. *Marine Biology*, 1985, 88(3): 217–233.
- [27] 于婉君. 涠洲岛珊瑚礁区的底质特征及其对珊瑚分布的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2022.
Yu Wanjun. Substrate characteristics of the area of Weizhou Island reef and ITS effects on the distribution of corals[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [28] Kojis B L, Quinn N J. Reproductive ecology of two faviid corals (coelenterata: scleractinia)[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1982,

- 8(3): 251–255.
- [29] Maboloc E A, Jamodiong E A, Villanueva R D. Reproductive biology and larval development of the scleractinian corals *Favites colemani* and *F. abdita* (Faviidae) in northwestern Philippines[J]. *Invertebrate Reproduction & Development*, 2016, 60(1): 1–11.
- [30] Lin C H, Nozawa Y. The influence of seawater temperature on the timing of coral spawning[J]. *Coral Reefs*, 2023, 42(2): 417–426.
- [31] Shikina S, Chang C F. Sexual reproduction in stony corals and insight into the evolution of oogenesis in Cnidaria[M]//Goffredo S, Dubinsky Z. *The Cnidaria, Past, Present and Future: The World of Medusa and Her Sisters*. Cham: Springer, 2016: 249–268.
- [32] Gomez E J, Jamodiong E A, Maboloc E A, et al. Gametogenesis and reproductive pattern of the reef-building coral *Acropora millepora* in northwestern Philippines[J]. *Invertebrate Reproduction & Development*, 2018, 62(4): 202–208.
- [33] Munasik M, Widyatmoko W. Reproduksi karang *Acropora aspera* di Pulau Panjang, Jawa Tengah: I. Gametogenesis[J]. *Indonesian Journal of Marine Sciences*, 2004, 9(4): 211–216.
- [34] Huang Boyin, Thorne P W, Banzon V F, et al. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(20): 8179–8205.
- [35] Fan T Y, Dai Changfeng. Reproductive plasticity in the reef coral *Echinopora lamellosa*[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 190: 297–301.
- [36] Rossi S, Gili J M, Coma R, et al. Temporal variation in protein, carbohydrate, and lipid concentrations in *Paramuricea clavata* (Anthozoa, Octocorallia): evidence for summer–autumn feeding constraints[J]. *Marine Biology*, 2006, 149(3): 643–651.
- [37] Baird A H, Guest J R, Edwards A J, et al. An Indo-Pacific coral spawning database[J]. *Scientific Data*, 2021, 8(1): 35.
- [38] 韦芬, 黄雯, 余克服, 等. 广西涠洲岛黄癣蜂巢珊瑚、肉质扁脑珊瑚的胚胎和幼虫的早期发育 [J]. *海洋学报*, 2020, 42(4): 87–95.
Wei Fen, Huang Wen, Yu Kefu, et al. Embryonic and larval early development of *Favia favus* and *Platygyra carnosus* in the Weizhou Island, Guangxi[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(4): 87–95.
- [39] 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.
- [40] Shlesinger T, Loya Y. Breakdown in spawning synchrony: a silent threat to coral persistence[J]. *Science*, 2019, 365(6457): 1002–1007.
- [41] Guest J R, Baird A H, Goh B P L, et al. Seasonal reproduction in equatorial reef corals[J]. *Invertebrate Reproduction & Development*, 2005, 48(1/3): 207–218.
- [42] Fogarty N D, Marhaver K L. Coral spawning, unsynchronized[J]. *Science*, 2019, 365(6457): 987–988.
- [43] Keith S A, Maynard J A, Edwards A J, et al. Coral mass spawning predicted by rapid seasonal rise in ocean temperature[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2016, 283(1830): 20160011.
- [44] 黄洁英, 黄晖, 张浴阳, 等. 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*, 2011, 30(2): 67–73.
Huang Jieying, Huang Hui, Zhang Yuyang, et al. Embryonic and larval development of *Montipora turgescens* and *Acropora robusta*[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(2): 67–73.
- [45] Lin C H, Nozawa Y. Variability of spawning time (lunar day) in *Acropora* versus merulinid corals: a 7-yr record of *in situ* coral spawning in Taiwan[J]. *Coral Reefs*, 2017, 36(4): 1269–1278.
- [46] Randall C J, Negri A P, Quigley K M, et al. Sexual production of corals for reef restoration in the Anthropocene[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2020, 635: 203–232.
- [47] Komoto H, Lin C H, Nozawa Y, et al. An external coincidence model for the lunar cycle reveals circadian phase-dependent moonlight effects on coral spawning[J]. *Journal of Biological Rhythms*, 2023, 38(2): 148–158.
- [48] Shoguchi E, Tanaka M, Shinzato C, et al. A genome-wide survey of photoreceptor and circadian genes in the coral, *Acropora digitifera*[J]. *Gene*, 2013, 515(2): 426–431.
- [49] Lin C H, Takahashi S, Mulla A J, et al. Moonrise timing is key for synchronized spawning in coral *Dipsastraea speciosa*[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(34): e2101985118.
- [50] Kaniewska P, Alon S, Karako-Lampert S, et al. Signaling cascades and the importance of moonlight in coral broadcast mass spawning[J]. *eLife*, 2015, 4: e09991.
- [51] Shima J S, Osenberg C W, Alonzo S H, et al. How moonlight shapes environments, life histories, and ecological interactions on coral reefs[J]. *Emerging Topics in Life Sciences*, 2022, 6(1): 45–56.
- [52] Wolstenholme J, Nozawa Y, Byrne M, et al. Timing of mass spawning in corals: potential influence of the coincidence of lunar factors and associated changes in atmospheric pressure from northern and southern hemisphere case studies[J]. *Invertebrate Reproduction & Development*, 2018, 62(2): 98–108.

Gonadal development of *Acropora formosa* and *Favites abdita* in Weizhou Island

Wei Fen¹, Cui Mengyao^{1,2}, Yu Kefu^{1,3}, Huang Wen¹, Zhang Yuanyuan¹, Zeng Xinru¹,
Wei Penghui¹, Pan Xiaoyuan^{1,2}

(1. School of Marine Sciences, Guangxi University/Coral Reef Research Center of China, Guangxi University/Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, Nanning 530004, China; 2. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

Abstract: Gonadal development is a crucial process for sexual reproduction in scleractinian corals, after the gonad matured, corals will spawn in suitable environments, understanding this process is essential for predicting their spawn time. However, there is no report on the gonadal development cycle and the spawning time of corals in Weizhou Island is currently unknown. From September 2021 to May 2022, our study focused on *Acropora formosa* and *Favites abdita* in Weizhou Island to observe their gonadal development process and spawning time. In the wild, the oocytes of *A. formosa* began to develop in September and matured after nine months, while the testes were observed in November and matured after two to three months. In *F. abdita*, the onset of oocytes was between in October and November, mature oocytes were observed after seven to eight months, with the development period of the testes was about one to two months. Both corals' gametes matured in May. In tanks, both corals were observed to spawn between May 19 to 22, 2022 (April 19 to 22, Chinese lunar calendar), which was consistent with their spawning observed in wild. Based on the results, we postulate that the spawning time of *A. formosa* and *F. abdita* in Weizhou Island is around April 15th, Chinese lunar calendar. This study provides valuable information on the reproductive biology of Weizhou Island corals.

Key words: scleractinian coral; spawning time; gonad; histological analyses; sexual reproduction; Weizhou Island