

西沙群岛珊瑚幼体培育实验^{*}

张浴阳^{1,2}, 黄 晖^{1,3}, 黄洁英⁴, 袁 涛¹

(1. 中国科学院海洋生物资源可持续利用重点实验室 广州 510301; 2. 中国科学院大学 北京 100039;
3. 中国科学院海南热带海洋生物实验站 三亚 572000; 海洋开发规划设计研究院, 海南省海洋与渔业科学院 海口 570125)

摘 要:西沙群岛的珊瑚礁不仅提供了丰富的渔业资源,也保护了各岛礁免受海浪及台风的侵蚀。但近年的调查显示西沙珊瑚礁的退化程度十分严重,其中最重要的是珊瑚数量急剧降低。为了促进珊瑚礁生态恢复,实验在西沙群岛的永兴岛上收集珊瑚有性繁殖产生的受精卵,在人工条件下培育并促使其附着,共培育出 3 700 个珊瑚幼体并放归野外,为退化的珊瑚礁增加了幼体补充数量。通过本实验确定了珊瑚卵的受精及珊瑚幼体附着过程是珊瑚幼体培育的关键环节,并发现幼体培育密度及幼体附着基底是决定培育效果的重要因素。

关 键 词:珊瑚礁修复;珊瑚有性繁殖;珊瑚幼体;珊瑚培育

1 前言

珊瑚礁生态系统作为海洋中的绿洲,不仅具有高度的生物多样性,而且聚集了丰富的渔业资源,并且由于其景观的独特性及具备数量众多的海洋生物而成为重要的旅游热点。珊瑚礁主要是由造礁石珊瑚缓慢生长的碳酸钙骨骼经过长时间的堆积而成,在此过程中会逐渐突出海面形成珊瑚岛或沙洲。除高尖石外,西沙群岛的各岛礁与沙洲都是由造礁石珊瑚骨骼堆积而成的。环绕这些岛礁周围的珊瑚礁不但提供了丰富的渔业资源,而且还为岛礁提供了保护,削弱了台风和海浪对岛礁的侵蚀。此外,岛礁与沙洲会受到海水与风力的侵蚀,而岛礁如果没有周围珊瑚礁上的新生的珊瑚骨骼补充则会在海浪侵蚀下逐渐缩小。一旦珊瑚礁生态系统严重退化,造成岛礁及沙洲因海水侵蚀而消失,则会造成这些岛礁及其周边的海洋领土丢失的严重后果。因此,珊瑚礁生态系统的健康状况对于南海的渔业经济、旅游业乃至维护我国蓝色海洋国土权益有着至关重要的作用。

然而近年西沙珊瑚礁状况调查显示,西沙的珊瑚礁正处于严重的退化状况,珊瑚覆盖率降低程度令人担忧。在 20 世纪 80 年代前对西沙永兴

岛的珊瑚礁的调查显示珊瑚的覆盖率可达到 70%^[1]。2002 年对永兴岛礁坪的断面调查显示其周边活珊瑚覆盖率变化范围是 42.1%~93.4%,优势种为鹿角珊瑚属和蔷薇珊瑚属^[2]。但永兴岛和七连屿的活珊瑚覆盖率从 2005—2006 年的 65%~70% 下降至 2008 年的 16.84%,随后在 2009 年达到 7.93%^[3]。珊瑚覆盖率的降低主要是由于在 2007 年及 2008 年,西沙群岛发生了长棘海星(*Acanthanster planci*)暴发事件,给珊瑚礁造成严重破坏^[4]。除了长棘海星外,珊瑚疾病也对西沙珊瑚造成严重影响,在西沙黑皮海绵与疾病引起的活珊瑚死亡的现象也多次在调查中发现。人类活动也持续对珊瑚产生威胁,过度捕捞、炸鱼、毒鱼以及挖取珊瑚和砗磲都对西沙珊瑚造成严重危害^[3,5]。珊瑚生物量的迅速减少会引起珊瑚礁生态系统的生物数量下降,特别是以珊瑚作为栖息地或避难所鱼类和同珊瑚共生的小型无脊椎动物更是同珊瑚息息相关^[6-7]。此外,较低的珊瑚数量意味着可产生卵子及精子的母体数量少,造成珊瑚受精卵数量降低、幼体补充数量减少,使得珊瑚的数量更加难以恢复。

西沙珊瑚礁的衰退状况应当引起我们的重视和警惕,为了拯救仅存的珊瑚礁生物资源和维护我

^{*} 基金项目:国家科技支撑计划项目(2009BAB44B01);海南省重大项目(ZDZX2013014-3)。

国的海洋领土,珊瑚的保护与恢复工作应作为关注重点。珊瑚恢复工作主要是通过培育与移植增加珊瑚的数量,利用积极的人为手段促进珊瑚数量恢复进程的加快^[1,8]。但是我国的珊瑚恢复工作刚刚起步,有关的珊瑚培育工作也仅限在沿岸珊瑚礁^[9]。为了保护西沙珊瑚礁、提高珊瑚数量恢复速度,本实验在西沙群岛的永兴岛上利用珊瑚有性繁殖产生的受精卵在人工条件下培育,并促使其附着,为野外珊瑚增加幼体补充数量。

2 材料与方法

西沙永兴岛位于我国西沙群岛的宣德群岛,是西沙群岛中最大的岛屿,其周边围绕着珊瑚礁。本实验所用的珊瑚受精卵采集于永兴岛周边的珊瑚礁,采集地点位于永兴岛南侧残留的一片珊瑚分布区。该区域珊瑚分布深度为1~5 m,范围约为2.5~3 hm²,其珊瑚覆盖率远高出周边区域,主要优势种类为鹿角珊瑚、杯型珊瑚及蔷薇珊瑚。

经过近几年的调查,我们发现西沙群岛造礁石珊瑚繁殖期为每年的3~4月。大量珊瑚在繁殖期内同步排出精子与卵子,排放在海水中的卵子很快受精形成受精卵,经过3~5 d发育成具备游动能力的浮浪幼虫,再寻找合适基底附着变态为小的珊瑚个体。但是珊瑚卵为浮性卵,漂浮在水面,随水流散播,在发育期会随水流漂流至周边海域。造礁石珊瑚适宜的生长环境为0~40 m的深度,幼体附着也多发生在此深度范围内。所以当珊瑚幼体漂流至合适深度时才有机会附着,而在深海范围则无法附着,除被浮游生物或鱼类捕食外,就只能消耗完自身储存的能量而死亡。为了减少珊瑚幼体被摄食与漂流至深海的损失,我们采用人工培育的方法,保证了可用珊瑚幼体的数量。

2011年,永兴岛珊瑚于3月21日排卵,排卵珊瑚主要为鹿角珊瑚(*Acropora spp.*)。珊瑚排出的卵子在水面漂浮,在产卵开始后约1 h水面卵子密度接近最大。在渔船上利用120目的网具在水面及潜水在水下收集珊瑚卵,并将卵子轻轻洗入放置在船上预先放有海水的塑料桶中。卵子在捞取及洗脱时尽量保证动作轻柔,避免剧烈水流直接冲刷珊瑚受精卵。收集到足够数量的珊瑚卵后,返回到位于永兴岛的珊瑚养殖基地,用网

具小心地把卵子从桶中捞起放入已放好海水的玻璃钢大桶中。桶内海水的体积为2.5 m³,珊瑚卵在水面分布并不均匀,众多卵子在水面聚集结成小片,卵子相互黏附在一起。搅动均匀后,水面静止时,卵子仍然聚集成小片。利用气泵通过气石向水中充气,气石沿桶壁均匀分布,并在桶中央放入两块气石,保证充气均匀。在珊瑚卵子附着前每天更换1/3的养殖水体。

对玻璃钢桶中珊瑚卵子数量取样统计前,先缓慢地不规则搅动桶内的海水,使桶内的珊瑚卵子分布均匀。然后采取水样100 mL,并记录水体中珊瑚受精卵的数量。重复采水5次,位置分别为大桶四周及中间。每日统计一次水体中珊瑚卵子数量。

在珊瑚卵发育至浮浪幼虫阶段,其具备自主游动能力时,将准备好的珊瑚幼体附着基放入玻璃钢桶内用于珊瑚浮浪幼虫的附着。3月24日,我们将预先浸泡在永兴岛港池中两个月的2 000个红土烧制的四脚块(5 cm大小)及1 000个陶瓷环(直径2 cm)作为附着基投放入玻璃钢桶内(图1)。分别放置在桶底及距底部0.4 m深的PVC管架上。3月25日,从野外挑选表面覆盖有珊瑚藻的死亡1年以上的珊瑚骨骼采集回养殖基地,以及收集放置在港口中浸泡1年的陶瓦,将两者共73块清洗表面后,作为附着基在3月26日放入玻璃钢桶内。在放置附着基后,仍然每天统计水体中珊瑚幼体的数量。

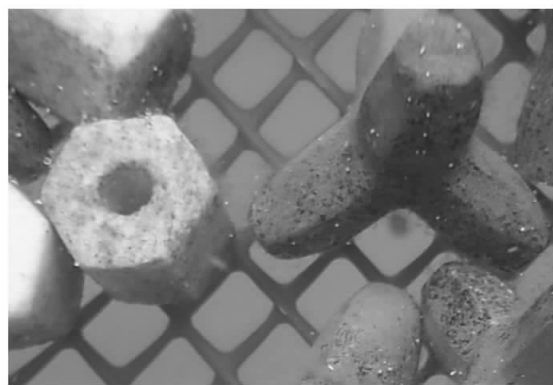


图1 用作附着基的四脚块与陶瓷环

3 结果

自野外收集的珊瑚卵全部为鹿角珊瑚的卵

子,当晚珊瑚产卵时在水下观察到多种鹿角珊瑚排卵,但未见其他种类珊瑚产卵,故未收集到其他种类珊瑚的卵子。水面漂浮的珊瑚卵子来自多种鹿角珊瑚母体,仅靠珊瑚受精卵无法鉴定其种类。收集到的珊瑚卵子可用肉眼分辨大小上的明显差异。

3.1 珊瑚受精卵的发育与幼体附着

收集回永兴岛珊瑚养殖基地的珊瑚卵状态良好,在放入玻璃钢桶时就已经有部分卵子开始发育。正常的珊瑚受精卵在产卵后的 2 h 内开始分裂为 2 细胞,随后发育至 4 细胞、8 细胞、桑椹胚、囊胚、原肠胚,最后形成浮浪幼虫。整个发育过程与在 2009 年三亚所记录的壮实鹿角珊瑚 (*Acropora robusta*) 受精卵发育过程基本相同^[9],仅在发育时间上有差异。部分珊瑚卵子在 2 h 后仍未分裂,说明其未能受精。未受精卵细胞膜易破裂,因其中包含有大量脂类,破裂后在水面形成一层油膜。油膜具有黏性,将漂浮于水面的受精卵粘连在一起,而且阻隔水面与空气的气体交换。

3 月 24 日多数珊瑚受精卵发育到浮浪幼虫阶段,身体变为细长的棒状,并且游动能力加强,游动具有明显的方向性(图 2a)。将浸泡在港池中的四脚块及陶瓷环捞出清洗后放入水体中,珊瑚幼虫显示出主动寻找附着基的行为。但随后的 2 d,珊瑚幼虫在附着基上并未发生变态附着行为,并且部分幼虫出现死亡的情况。故在 3 月 26 日将珊瑚骨骼及陶瓦作为附着基放置在四脚块和陶瓷环旁,发现珊瑚幼虫在这两者上能够很快变态附着。幼体选择合适基底后,虫体将会很快发生形变,口盘向上,反口面膨大,幼虫呈现梨形(图 2b)。当附着的珊瑚幼虫附着端完全扩展,紧贴基底,口盘面向上,周围可见 6 个触手状突起,说明已经完成附着变态形成了小珊瑚幼体(图 2c)。在随后的 1~2 d 内,珊瑚幼体可以看见明显的骨骼形成,骨骼呈乳白色,以口盘为中心,向外散发 12 道辐射肋,口盘处的触手也增加为 12 条(图 2d)。这时珊瑚幼体利用无性繁殖生长,1 周后,具有 2 个杯的珊瑚个体出现,每个珊瑚杯各具一个珊瑚虫(图 2e)。再经过 1 个月后,具有 4~5 个杯的珊瑚个体即可放归海中(图 2f)。

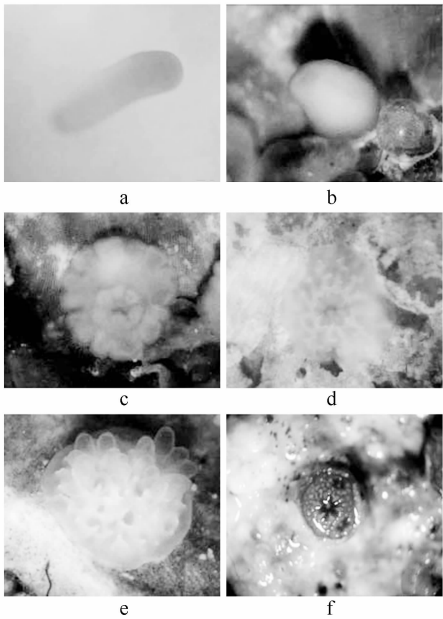


图 2 珊瑚浮浪幼虫附着变态过程
a 珊瑚浮浪幼虫;b 浮浪幼虫底部膨大附着在基底上;c 触手出现;d 骨骼形成;e 形成 2 个珊瑚杯的幼体;f 具有多个珊瑚杯的小珊瑚补充

3.2 珊瑚卵的培育效果与附着基底的影响

3 月 21 日晚对收集的珊瑚卵子数量统计,得知共采集珊瑚卵子约 36.3 万颗(图 3),其中包括受精卵及未受精卵。未受精卵在随后的 24 h 内多数破裂,3 月 22 日的珊瑚卵数量下降至 73.9%,说明约有 1/4 的卵子为未受精卵。在随后的一天珊瑚幼体数量下降趋势明显减缓,总数仅比 3 月 22 日减少了 0.5 万。在 3 月 23 日放入四脚块和陶瓷环后,水体中自由活动的珊瑚浮浪幼虫数量迅速从 26.3 万降至 7.8 万,说明珊瑚幼体附着行为非常活跃。但在第二天附着趋势减缓,水体中剩余的浮浪幼虫仅有 14.3% 发生附着。3 月 26 日再放入珊瑚骨骼及陶瓦后,珊瑚浮浪幼虫再次显示出活跃的附着行为。随后的 3 d 浮浪幼虫基本全部附着在附着基上,水体中仅存极少自由游动的幼虫(图 3)。

虽然全部浮浪幼虫都发生附着行为,但在不同的附着基上,产生了截然不同的结果。四脚块和陶瓷环虽然先放入水体中,因其表面覆盖着一层细细的绒状藻(turf algae),所有试图附着在这两种附着基表面的珊瑚幼虫都被绒状藻困住,既不能产生附着变态行为,也无法游离,最终在这

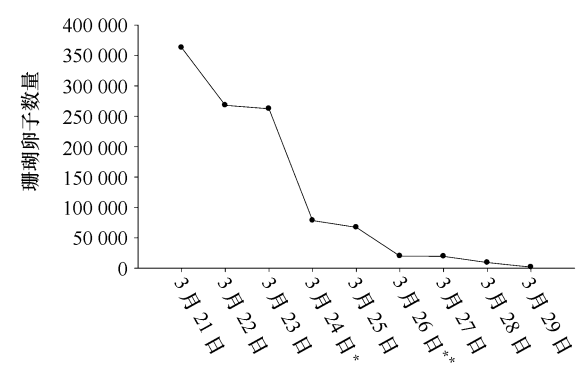


图3 水体中珊瑚卵子数量变化

*：投放入红土块及陶瓷环；**：投放入珊瑚骨骼及陶瓦

种“陷阱”中死亡。而后放入的珊瑚骨骼及陶瓦，表面多为珊瑚藻，附着在其上的珊瑚浮浪幼虫很快发生附着变态，形成珊瑚幼体。在4月17日对附着幼体数量统计，附着在珊瑚骨骼及陶瓦上的珊瑚幼体约为3700个，而在四脚块及陶瓷环上则未发现任何发生附着的幼体。在4月23日将培育的珊瑚幼体放归于永兴岛西南礁坡，在水深3m的礁坡上用螺丝固定在礁底。

4 讨论

通过利用珊瑚有性繁殖产生的卵子用于珊瑚的修复工作的关键在于三个方面：首先是提高珊瑚受精卵发育至浮浪幼虫阶段的存活率；其次要选取合适的附着基增加幼体附着率及存活率；最后应选择或创造合适的环境提高珊瑚幼体生长率。而本实验涉及的主要是前两个方面。

未受精的珊瑚卵子因含有大量脂类，且细胞膜易破碎，为珊瑚幼体的培育增加了难度。由野外收集的珊瑚卵无法判断收集的卵子是否充分受精，且海水中珊瑚精子浓度往往较低，而在实验室内收集可通过充分搅拌混合珊瑚排出的精卵提升珊瑚卵子受精率^[10]。在实验中通过显微镜观察珊瑚卵子，多次见到单个卵子破裂，但未见发育至2细胞后的卵子破裂。故本实验中假设破裂的珊瑚卵子为未受精卵，再根据第二天珊瑚卵子数量的降低推测珊瑚卵未受精率约为25%。未受精卵破裂释放出的脂类会在水面形成油膜黏附珊瑚卵，造成许多珊瑚卵粘贴在一起，使得位于中间的珊瑚受精卵因缺氧而死亡。另外大片的油膜也阻隔了水面同空气的气体交

换，引起水体缺氧，增加了水体中珊瑚受精卵的死亡率。因此，降低培育系统中未受精珊瑚卵的数量有利于珊瑚受精卵的存活与发育，同时控制水体中培育的珊瑚受精卵数量密度在合适范围也能有效降低死亡率^[10]。

珊瑚浮浪幼虫对于附着基底具有明显的选择性，因此选择合适的附着基也是珊瑚幼体培育的关键。珊瑚幼虫对于基底的选择具有偏好性，珊瑚藻可以诱导珊瑚浮浪幼虫发生变态^[11-12]，也有人利用从珊瑚藻上分离的细菌诱导珊瑚幼虫变态^[13]。而大型藻类及绒状藻则会同珊瑚幼体竞争，珊瑚幼体难以在其附近的底质上附着生存^[14-16]。因此在选择适合珊瑚幼虫附着的基底时应挑选覆盖有珊瑚藻，而不应附着有大型藻类及绒状藻的附着基。野外采集用于附着基的珊瑚骨骼应依照此条件选择，而人工附着基则需要预先处理后才能用于珊瑚的附着。尽管在本实验中，投放的人工材质的四脚块及陶瓷环效果未有幼体附着，但这并不能说明人工材料不适于用作珊瑚的附着基。人造陶瓦在多个实验中已被证明可以用于珊瑚幼体的附着基^[17-20]，同样在此实验中附着在陶瓦上的珊瑚幼体能够正常附着变态。四脚块同陶瓷环应是预处理时间不足，未能让珊瑚藻形成主要的优势种，而浸泡一年的陶瓦则在其表面长有相当一部分的珊瑚藻。附着基表面生物构成不同造成了附着率和存活率的差异。由此可知应当尽可能保证附着基的表面覆盖有珊瑚藻，以利于珊瑚幼虫的附着和存活，同时也要注意减少其表面生长的大型藻类及绒状藻。

5 结论

全面开展西沙珊瑚礁修复工作已是迫在眉睫，其中珊瑚幼体培育工作则是关键部分。通过此实验，培育了3700个珊瑚幼体，并放归至退化珊瑚礁，增加了珊瑚礁的幼体补充。此外在实验过程中确定了珊瑚卵的受精及珊瑚幼体附着过程是珊瑚幼体培育的关键环节，并发现幼体培育密度及幼体附着基底是决定培育效果的重要因素。本实验为西沙的大规模珊瑚修复工作提供了技术基础和指导经验。

参考文献

[1] 李元超, 黄晖, 董志军, 等. 珊瑚礁生态修复的研究进展 [J]. 生态学报, 2008, 28(10): 1—8.

[2] 李颖虹, 黄小平, 岳维忠, 等. 西沙永兴岛珊瑚礁与礁坪生物生态学研究 [J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(2): 176—82.

[3] 吴钟解, 王道儒, 涂志刚, 等. 西沙生态监控区造礁石珊瑚退化原因分析 [J]. 海洋学报, 2011, 33(4): 140—6.

[4] 黄晖, 尤丰, 练健生, 等. 西沙群岛海域造礁石珊瑚物种多样性与分布特点 [J]. 生物多样性, 2011, 19(6): 710—5.

[5] 黄晖, 董志军, 练健生. 论西沙群岛珊瑚礁生态系统自然保护区的建立 [J]. 热带地理, 2008, 28(6): 540—4.

[6] MOBERG F, FOLKEA C. Ecological goods and services of coralreef ecosystems [J]. Ecological Economics, 1999, 29(2): 215—33.

[7] CHABANET P, RALAMBONDRAIN H, AMANIEU M, et al. Relationships between coral reef substrata and fish [J]. CORAL REEFS, 1997, 16(2): 93—102.

[8] CLARK S, EDWARDS A J. Coral ransplantation as an aid to reef rehabilitation; evaluation of a case study in the Maldive Inlands [J]. CORAL REEFS, 1995, 14: 201—203.

[9] 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.

[10] EDWARDS A, JAMES GUEST, SHAFIR S, et al. Reef rehabilitation manual [M]. The Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, 2010.

[11] HEYWARD A J, NEGRI A P. Natural inducers for coral larval metamorphosis [J]. Coral Reefs, 1999, 18(3): 273—9.

[12] TEBBEN J, TAPIOLAS D M, MOTTI C A, et al. Induction of Larval Metamorphosis of the Coral *Acropora millepora* by Tetrabromopyrrole Isolated from a *Pseudoalteromonas* Bacterium [J]. Plos One, 2011, 6(4)

[13] NEGRI A P, WEBSTER N S, HILL R T, et al. Metamorphosis of broadcast spawning corals in response to bacteria isolated from crustose algae [J]. Mar Ecol-Prog Ser, 2001, 223: 121—131.

[14] BOX S J, MUMBY P J. Effect of macroalgal competition on growth and survival of juvenile Caribbean corals [J]. Mar Ecol-Prog Ser, 2007, 342: 139—149.

[15] BIRRELL C L, MCCOOK L J, WILLIS B L. Effects of algal turfs and sediment on coral settlement [J]. Mar Pollut Bull, 2005, 51(1—4): 408—414.

[16] BIRRELL C L, MCCOOK L J, WILLIS B L, et al. Chemical effects of macroalgae on larval settlement of the broadcast spawning coral *Acropora millepora* [J]. Mar Ecol-Prog Ser, 2008, 362: 129—137.

[17] FRANKLIN H, MUHANDO C A, LINDAHL U. Coral culturing and temporal recruitment patterns in Zanzibar, Tanzania [J]. Ambio, 1998, 27(8): 651—655.

[18] GREEN D H, EDMUNDS P J. Spatio-temporal variability of coral recruitment on shallow reefs in St. John, US Virgin Islands [J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2011, 397(2): 220—229.

[19] BRAMANTI L, ROSSI S, TSOUNIS G, et al. Settlement and early survival of red coral on artificial substrates in different geographic areas: some clues for demography and restoration [J]. Hydrobiologia, 2007, 580: 219—224.

[20] QUINN N J, KOJIS B L. Patterns of sexual recruitment of acroporid coral populations on the West Fore Reef at Discovery Bay, Jamaica [J]. Rev Biol Trop, 2005, 53: 83—90.