

# 珊瑚人工繁育技术研究进展\*

王淑红<sup>1,3</sup> 洪文霆<sup>1,3</sup> 陈纪新<sup>2\*\*</sup> 陈 芸<sup>1,3</sup> 王艺磊<sup>1</sup> 张子平<sup>4</sup> 翁朝红<sup>1</sup> 谢仰杰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>集美大学水产学院, 福建厦门 361021; <sup>2</sup>近海海洋环境科学国家重点实验室/厦门大学环境与生态学院, 福建厦门 361005;

<sup>3</sup>浙江海洋高效健康养殖协同创新中心, 浙江宁波 315211; <sup>4</sup>State University of New York at Cobleskill, Biotechnology Program, Cobleskill, NY 12043, USA)

**摘 要** 在气候变化、环境污染以及人工采集等因素致使珊瑚野生资源不断衰退的背景下, 开展珊瑚的人工繁育是修复珊瑚生态系统、保护生物多样性、减少野生珊瑚采集的主要出路之一. 本文对国内外珊瑚人工繁育技术和研究进展进行综述, 探讨了珊瑚有性和无性繁殖技术以及原地和异地繁育技术的特点与不足; 重点从光照、水流、营养盐、微量元素、非自养珊瑚品种的饵料, 以及适宜的微生物环境等方面总结了循环海水系统繁育珊瑚的研究进展, 并对我国珊瑚研究现状进行了总结. 光照是珊瑚水族箱养殖或异地繁殖的关键因素之一, 不同种类的珊瑚对光照强度和色温有不同的需求, 珊瑚照明创新技术的发展及其能耗对于珊瑚异地繁育非常重要. 此外, 珊瑚对铵氮、硝氮、亚硝氮及磷酸盐等营养盐的变化非常敏感, 各类机械、化学和生物的技术被应用于降低培养体系中营养盐的含量. 尽管珊瑚循环海水养殖系统在照明、水流和营养盐控制方面已经有了长足的进步, 珊瑚人工繁育仍然任重道远. 将来的突破方向在于有性繁殖、性状改造与疾病防治技术等方面.

**关键词** 珊瑚人工繁育; 循环海水培育系统; 珊瑚疾病

**文章编号** 1001-9332(2015)09-2903-10 **中图分类号** S968.9 **文献标识码** A

**Research progress on techniques for artificial propagation of corals.** WANG Shu-hong<sup>1,3</sup>, HONG Wen-ting<sup>1</sup>, CHEN Ji-xin<sup>2</sup>, CHEN Yun<sup>1,3</sup>, WANG Yi-lei<sup>1</sup>, ZHANG Zi-ping<sup>4</sup>, WENG Zhao-hong<sup>1</sup>, XIE Yang-jie<sup>1</sup> (<sup>1</sup>College of Fisheries, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Marine Environmental Science/College of Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; <sup>3</sup>Collaborative Innovation Center for Zhejiang Marine High-efficiency and Healthy Aquaculture, Ningbo 315211, Zhejiang, China; <sup>4</sup>State University of New York at Cobleskill, Biotechnology Program, Cobleskill, NY 12043, USA). -Chin. J. Appl. Ecol., 2015, 26(9): 2903–2912.

**Abstract:** The natural coral reef resources degrade rapidly because of climate change, environmental pollution and exploitation of aquarium species. Artificial propagation is an effective way to facilitate the reduction of wild harvesting, reef restoration, preservation of biodiversity. This paper reviewed the technique and research progresses focused on coral artificial propagation. We compared the advantages and disadvantages of sexual reproduction and asexual reproduction as well as *in situ* and *ex situ* propagation. Moreover, we summarized the important roles of irradiation, flow rate, nutrients, feed and other factors in coral propagation within recirculating aquaculture system (RAS). Irradiation is the key to successful *ex situ* coral culture and different species show different needs of radiation intensity and light spectrum. Therefore, artificial lighting in RAS, as well as power and maintenance costs, are very important for *ex situ* coral aquaculture. In addition, corals are very sensitive to  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  as well as phosphate in RAS, and many physical, chemical and biological methods are acquired to maintain low nutrients condition. Although RAS has progressed a lot in terms of irradiation, flow rate and nutrient control, future studies also should focus on sexual reproduction, genetic modification and disease control.

**Key words:** coral artificial propagation; RAS; FITAS; coral disease.

\* 国家海洋局公益性行业科研专项(201305027)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: brighchen@xmu.edu.cn

2014-11-19 收稿, 2015-06-25 接受.

珊瑚属腔肠动物门 (Coelenterata) 珊瑚虫纲 (Anthozoa), 是腔肠动物门中最大的一个纲, 有 7000 多种, 均为海产。珊瑚虫纲又分为八放珊瑚亚纲及六放珊瑚亚纲。根据骨骼质地和水螅体大小, 珊瑚一般分为大水螅体石珊瑚 (large polyp scleractinian, LPS)、小水螅体石珊瑚 (small polyp scleractinian, SPS)、软珊瑚以及海葵等几种类型。珊瑚礁生态系统也被称为水下“热带雨林”, 具有保护海岸、维护生物多样性、维持渔业资源、吸引旅游观光等重要功能。许多珊瑚个体色彩绚丽, 艳丽的颜色不逊色于陆地上的各种鲜花, 有的珊瑚品种还有惊艳的荧光效果, 不同类型的珊瑚可在水族箱中构成立体的珊瑚礁生态系统, 使珊瑚在水族行业中具有极大的竞争力。

目前, 珊瑚资源正在经历全球范围的急剧衰退, 珊瑚礁的覆盖率和完整性近数十年受到了令人震惊的损失。究其原因, 大范围的全球气候变化以及地区性的人类活动的影响, 包括对珊瑚自然资源的需求及环境污染等原因难逃其咎<sup>[1]</sup>。其中海水水族贸易 (marine aquarium trade, MAT) 被列为珊瑚保护的主要威胁之一。MAT 涉及从超过 40 个国家捕捞超过 1800 种野生海水鱼和大约上千种无脊椎动物和珊瑚<sup>[2]</sup>。约有 140 种石珊瑚作为水族品种而进入交易市场<sup>[3]</sup>。作为珊瑚的主要出口国印度尼西亚, 2001 年出口珊瑚 669192 株, 2005 迅速增长为 1063990 株<sup>[4]</sup>。2010 年单美国的进口珊瑚株就超过 50 万株<sup>[5]</sup>。为了更好地保护珊瑚资源, 30 多个国家已经禁止或限制了硬珊瑚的采集和出口。所有硬骨珊瑚都被列入了濒危动植物物种国际贸易公约 (CITES) 的附录 II 中<sup>[4]</sup>。该公约规定只有在出口国颁发许可证的情况下, 才能合法出售珊瑚。尽管如此, 珊瑚仍被非法走私, 并且所设定的出口配额也经常与最大持续产量不相匹配<sup>[6]</sup>。

发展珊瑚的人工繁育是解决濒危的野生珊瑚资源与不断壮大的珊瑚需要之间矛盾的主要出路之一。除了迅速增长的水族市场, 具有药物和医学应用价值等活性成分的生物资源开发<sup>[7-10]</sup>、野外珊瑚生态系统的复原、开展以珊瑚为对象的科学研究等<sup>[11-12]</sup>都对人工繁育珊瑚有很大的需求。同时, 人工繁育技术的研究也会极大地促进珊瑚生态学、生理学等学科的进展。因此, 在过去的几十年, 研究机构、水族馆等企业和水族爱好者一直致力于珊瑚人工繁育技术的探索与优化, 也取得了一些可喜的进展。本文将对国内外珊瑚人工繁育的技术和研究进

展进行综述, 希望能为我国的珊瑚人工繁育工作提供参考, 并为野生珊瑚资源的保护做些贡献。

## 1 珊瑚的有性繁殖技术和无性繁殖技术

珊瑚既可有性繁殖 (sexual reproduction) 也可无性繁殖 (asexual reproduction)。珊瑚的有性繁殖具有繁殖力强、遗传多样性高及不损伤母体珊瑚等优点<sup>[13-14]</sup>。珊瑚的有性繁殖一直是研究的重点之一, 目前对具有重要生态地位的珊瑚种类的繁殖生物学方面开展的研究较多, 这些研究对自然环境下种群的配子成熟、产卵的环境因素调控, 如光周期 (月光)、温度、盐度的重要性等有较多涉及。但是对于绝大部分珊瑚种类配子成熟与释放的生理过程及细胞调控机制还缺乏了解, 实现在人工环境下珊瑚的性成熟和有性繁殖还较为困难, 尚不具备大规模与产业化应用的能力。目前人工有性繁殖的主要方式是在天然珊瑚礁中出现大量排卵时人工收集受精卵细胞, 然后将受精卵细胞转移至受控培养体系中进行发育学研究。比如鹿特丹港市动物园、新西兰和德国的杜伊斯堡-埃森大学等多个公共水族馆和研究机构于 2001 年开始了 SECORE (sexual coral reproduction) 项目, 通过这种方式对珊瑚的人工有性繁殖进行了有益的尝试。项目在珊瑚幼虫的附着率和幼体存活率方面取得了一定的成果, 显示了一些无性繁殖所不具备的优越性<sup>[14-15]</sup>。但是, 由于珊瑚有性繁殖季节性很强, 每年一次只在特定的时间排放精卵。对于远离珊瑚礁生态系统的机构而言, 有性繁殖母体或幼体的获得和运输都存在一定的难度。此外, 珊瑚幼体在附着后的最初几周和几个月是死亡率较高的瓶颈阶段, 尽管近年来研究者对珊瑚幼体附着及发育机制有了更多的了解, 取得了一定的突破<sup>[16-17]</sup>, 但死亡率仍然较高。再者, 幼体要成长为有观赏价值的珊瑚群落需要相当长时间的持续培养, 因而影响了珊瑚的产量并增加了养成阶段的死亡几率。这些不利因素限制了珊瑚人工有性繁殖的普及与推广。

相对珊瑚在有性繁殖方面的滞后, 珊瑚的无性繁殖技术已经得到广泛的应用。与鱼虾贝等常见海洋经济动物不同, 珊瑚所属的刺胞动物具有多种多样的无性繁殖方式, 涉及出芽、裂开、组织碎片的脱落、水螅体释放以及包囊的形成等, 发生在生活史的任何阶段, 最终都能发育成独立的功能个体<sup>[18-19]</sup>。这种简单经济的断裂生殖方式广泛被研究者、从业者以及珊瑚爱好者应用于软珊瑚和硬骨珊瑚的人工繁育, 获得了较高的存活率<sup>[20-21]</sup>, 是目前珊瑚人工

繁育的主要手段。

从发展趋势来看,人工有性繁殖技术无疑将成为未来珊瑚人工繁育的重要方式,包括珊瑚个体配子成熟、释放调控机制、附着方式等重要问题的解决将促进人工诱导有性繁殖技术的应用,极大地提高子代的产量及生长效率。

## 2 原地和异地珊瑚繁育技术

珊瑚繁育可以在原地 (*in situ*) 也可以在异地 (*ex situ*) 进行。原地繁育是指在自然环境,如靠近珊瑚礁生态系统的水域中培育珊瑚。原地繁育的珊瑚不需要为其提供任何人工条件和必需元素,充分利用天然饵料及自然净化海水,可以显著降低生产成本。在印尼、马来西亚等开展的小水螅体石珊瑚大规模人工繁育主要就是通过这种方式进行。同时,原地繁育也是促进被破坏或白化的珊瑚礁恢复的主要方式。但是,原地繁育的珊瑚同自然珊瑚礁一样,暴露于藻类附生、沉积物、病原、捕食者、竞争者和其他自然危害,这些都可能降低其存活率<sup>[13]</sup>;在季节变动、极端环境变化、人为干扰的影响下,往往与自然珊瑚礁一起,发生白化甚至大面积死亡。对于多数珊瑚个体而言,原地繁育的生长环境往往不能提供最优化的生长条件,不能获得最高的生长速度;对大部分地区而言,并不具备通过原地繁育获得人工珊瑚的条件。

而异地繁育珊瑚虽然成本较高,但可以通过优化养殖环境而显著提高存活率和生长速度<sup>[16,22]</sup>。异地培育及非自然栖息地培育可以分为循环海水培育系统 (recirculating aquaculture system, RAS) 和近岸的流动海水培育系统 (flow-through aquaculture system, FTAS)。最早的珊瑚人工培养就是通过 FITAS 的方式,具有超过 50 年的历史,将天然海水直接或过滤消毒后连续泵入系统中,充分的水交换可以减少对海水过滤系统的投资,维护元素平衡;其限制也很明显,培养地点需要靠近合适的海水源,并且容易受到海水质量的影响。而 RAS 通过人工过滤系统循环净化海水,通过减少海水更换量来摆脱培养体系对自然海水的依赖,利用尽量完善的控制条件为珊瑚个体提供优化的环境条件,具有最佳的水流、光照、不需适应底质,以及被捕食风险降低等优点<sup>[11]</sup>。

## 3 RAS 系统人工繁育技术

目前为止,RAS 系统是珊瑚人工繁育最常用的方式。珊瑚人工繁育最关键的是为珊瑚提供一个适

宜的环境,主要包括光照、水流、水温、营养盐、微量元素、非自养珊瑚品种的饵料以及适宜的微生物环境等。这些参数如何影响珊瑚繁育等相关知识的不足,是影响珊瑚人工繁育计划成功的主要原因。近年来,许多学者针对上述影响珊瑚个体生长的因素进行了研究,取得了一定的进展。

### 3.1 光照

对于与虫黄藻 (*zooxanthellae*) 共生的珊瑚来说,其存活与虫黄藻的光合作用密切相关。光照是珊瑚水族箱养殖或异地繁殖的关键因素之一<sup>[23-25]</sup>。虫黄藻的光合作用产物被转移给宿主珊瑚,且能满足珊瑚绝大部分的能量需求<sup>[26-27]</sup>。已有研究表明,不同的光照可影响虫黄藻密度、光合色素浓度和光合作用效率<sup>[28-30]</sup>。虫黄藻的密度最终会影响到珊瑚的生理状态及其对环境胁迫的响应<sup>[31]</sup>。不同的珊瑚类型对光强需要有明显的差异,通常认为多数造礁石珊瑚对光照强度要求较高,但是培养体系中,光强并不是越强越好。Schutter 等<sup>[32]</sup>研究了 4 种光照条件对丛生盔形珊瑚 (*Galaxea fascicularis*) 骨骼生长和净光合作用的长期影响。结果表明,珊瑚断枝的生长随光照强度增加而增加,净光合作用也随光照强度增加而增加,但前者的增加幅度比依据后者推算的增加幅度小,说明在高光照强度水平下,净光合作用所获得的能量用于珊瑚骨骼生长的比例较低。软珊瑚对光照强度的要求通常更小。Rocha 等<sup>[33]</sup>对长时间培养在不同光照条件下一种软珊瑚 *Sinularia flexibilis* 的研究结果表明,低光强度下生长的珊瑚虫黄藻密度显著增加,而高光强度 ( $120 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 下光合色素浓度反而降低,在没有异源营养的情况下,低光照度并不影响珊瑚断枝的生长。同一作者研究了肉芝软珊瑚 (*Sarcophyton cf. glaucum*) 的光生物学和生长特性<sup>[34]</sup>,发现肉芝软珊瑚在低光照度 ( $50 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 下,光合效率、生物量、虫黄藻密度和光合色素浓度都显著高于高光照强度。这些研究表明,在人工繁育过程中,在最大化虫黄藻的光合色素或生物活性物质产量的前提下采用较低的光照强度,可以有效地控制珊瑚养殖成本。

光谱对珊瑚的光生物学、生理学和生长也有重要影响,要成功进行珊瑚异地繁育也要考虑灯的光谱特性<sup>[25,35]</sup>。总的来说,不同种类的珊瑚对光照强度和色温有不同的需求。珊瑚照明系统的费用是进行珊瑚异地繁育经济可行性的决定性因素,因此珊瑚照明创新技术的发展及其能耗对于珊瑚异地繁育非常重要<sup>[36]</sup>。传统的珊瑚照明系统通常采用 T5 荧光



灯和金属卤素灯(也叫水银石英碘化灯,hydrargyrum quartz iodide, HQI),近年来等离子(light emitting plasma, LEP)和发光二极管(light emitting diode, LED)等新型光源也开始应用于海水培养。LEP 的光学特性具有高效和宽光谱的特点,使得该技术在异地繁育设施中尤其令人关注。传统认为,尽管 LED 照明具有节能及高荧光显色的作用,但其较窄的光谱范围可能会抑制珊瑚的生长。但近年的一些研究表明,LED 作为珊瑚培养光源,也具有一些特点。Rocha 等<sup>[37]</sup>比较了 T5 荧光灯、LEP 和蓝光 LEDs 对美丽鹿角珊瑚(*Acropora formosa*)和萼柱珊瑚(*Stylophora pistillata*)的光生物学和生长的影响,发现蓝色光源(如蓝光 LED)可促进这两种珊瑚的生长。Wijgerde 等<sup>[38]</sup>进一步分析了不同波长的光源对萼柱珊瑚的生理影响,表明可见光谱中红光对珊瑚生长、健康、存活率、共生藻数量有负面影响。因此可以认为,LED 技术对于水族石珊瑚的异地培育是个有发展前途的技术。

### 3.2 水流

对于营固着生活的珊瑚而言,水流是影响其生长和代谢的非生物学因素中最重要的因素之一。水流可通过影响珊瑚对颗粒物的捕捉、营养摄取、虫黄藻的光合作用和呼吸的总体效应而影响珊瑚的生长率<sup>[39]</sup>,是珊瑚异地养殖另一重要物理因素。水流也会影响珊瑚的扩张<sup>[40]</sup>,是影响珊瑚形状的最重要的因素之一<sup>[40-41]</sup>。反之,珊瑚也可以通过改变自己的姿态而调整水流。珊瑚礁水流过低,可导致珊瑚营养不足,进而诱导光呼吸并降低光合作用<sup>[42]</sup>。尽管珊瑚生长随水流加强而增加<sup>[43]</sup>,不同种类石珊瑚的最佳水流并不相同。静水珊瑚(calm water coral)的蔷薇珊瑚(*Montipora verrocosa*),中等水流珊瑚(moderate water motion coral)如鹿角杯形珊瑚(*Pocillopora damicornis*)和高水流种(high water motion species)杯形珊瑚(*P. meandrina*)在实验室旺盛生长的水流速度分别为 1.7、4.7 和 6.6  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[43]</sup>或更高的流速( $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[44-47]</sup>。Khalesi 等<sup>[22]</sup>研究发现,软珊瑚(*Sinularia flexibilis*)在 11  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 水流的环境中表现出最高的生长速度。Boch 和 Morse<sup>[45]</sup>比较了水流速度不同的两个珊瑚礁对鹿角珊瑚(*Acropora* spp.)移植断枝生长和存活的影响,发现两个珊瑚礁站位移植珊瑚的存活率没有显著差别,而生长速度却随水流速度升高而显著增加;对于附着 1 周后移植的幼体,生活在快速流站位的生长率和存活率 1 年后都显著高于另一站位。

因此,在构建珊瑚人工繁育系统时,水流是重要的考量因素。目前市场上提供有各种不同功率的造流泵。水族爱好者发现不同频率的水流对珊瑚生长也有明显影响,特别是对于鹿角珊瑚而言,在变频式造流或多个水泵制造的乱流下,鹿角珊瑚的状态比单一方向和流速的水泵造流下更好。

### 3.3 RAS 系统中水质的控制

珊瑚对铵氮、硝氮、亚硝氮及磷酸盐等营养盐的变化非常敏感,高生物多样性的珊瑚礁生态系统存在于低营养盐海域。高营养盐可直接影响珊瑚的生长和繁殖,也会通过影响共生虫黄藻而提高珊瑚对白化和疾病的易感性;还会通过促进其他藻类的生长改变珊瑚礁群落结构<sup>[46,48-49]</sup>。对于封闭循环的人工珊瑚繁育系统,营养盐在水体中的积累以及植食鱼类和海胆等其他生物的缺失极易造成某些藻类的爆发,如何控制循环水系统中的低营养盐状态相当重要。各类机械、化学和生物的技术被应用于降低培养体系中营养盐的含量;其中蛋白质分离器(protein skimmer)利用气泡表面张力吸附水中的溶解和颗粒有机物,可有效减少水体中有机物的含量,降低营养盐过滤系统的压力,已经成为珊瑚人工繁育系统中低营养盐维护的重要一员。

在珊瑚饲养过程中有多种无机营养盐的过滤系统。应用最普遍的是柏林系统(Berlin system)。该系统主要利用活石中栖息的细菌降低铵氮和亚硝态氮,并运用藻缸饲养高等藻类以吸收硝态氮与磷酸盐。活石是水族系统中用于造景和生物过滤等功能的死珊瑚骨骼的俗称。活石内栖息生物众多,包括小型无脊椎动物、皮壳状珊瑚藻(crustose coralline algae)以及微生物(如硝化和反硝化细菌)。活石作为一种生物学除氮方式用于珊瑚水族已经具有很长的历史。Yuen 等<sup>[47]</sup>于 2009 年证明了活石可显著降低无机氮化合物( $(\text{NH}_4^+、\text{NO}_3^- \text{ 和 } \text{NO}_2^-)$ )的浓度,并使珊瑚维持较高的光合作用活性。他们还在活石中检测到 *amoA* 和 *nirS* 两种参与硝化和反硝化的功能基因,表明活石内存在硝化和反硝化细菌。

其次是主要依靠饲养间带藻类来吸收无机营养盐的藻屏过滤系统法(algal turf scrubber, ATS)。该方法主要利用充分爆气与高光强等条件促进间带藻类的生长而去除水体中的营养盐。该方法营养盐去除效率高,且经济实惠,但由于藻类快速生长会吸收  $\text{CO}_2$  与多种元素,容易造成 pH 升高、碳酸盐碱度(KH)下降以及多种元素失衡;水体中 pH、碳酸盐平衡和多种元素如 Ca、Mg、I、Sr 等的稳定对珊瑚的生

长和性状也非常重要,需要通过持续滴定补充相应的成分损失.第三种是沸石(ZEOvit)系统.该系统包括具有多孔结构的人造沸石(Zeolite)、栖息于沸石孔中的细菌(Zeobak)、细菌和珊瑚的食物(Zeofood)及有助于硝化细菌繁殖的碳源(ZeoStart).该系统组成简化,通过纯人工控制方式创造并维持与天然珊瑚礁环境类似的低营养盐环境,在降低氮磷营养盐的同时,将重要成分如钙、镁和碳酸盐硬度等也维持在天然珊瑚礁环境的水平<sup>[50]</sup>.该系统养殖的珊瑚颜色艳丽,但需要定期更换沸石,补充细菌及食物,因此成本较高.第四种方法是活砂过滤法.该方法利用很厚的砂层来制造缺氧环境,培养厌氧生物转化和吸收硝酸盐和磷酸盐.但由于该方法达到稳定状态的时间长、可变性大,所以目前较少使用.

在循环水珊瑚养殖体系中,大型污损藻类可通过混养海胆和腹足类等植食生物进行有效的生物学防治.Toh 等<sup>[49]</sup>将海胆和马蹄螺(*Trochus maculatus*)引入珊瑚水族箱,观察对鹿角杯形珊瑚幼体整体生长的影响.实验持续了24周,结果表明,与海胆和马蹄螺混养的幼体生长率是对照组的7~11倍.与对照组相比,混养组珊瑚的颜色较深且损伤少.混养组的藻类覆盖率和藻的生物量都显著低于对照组.值得注意的是,有些植食动物对食物具有选择性,可导致某类藻大量增殖,进而抑制珊瑚群落的正常生长<sup>[50-52]</sup>.

### 3.4 异养营养需求

如何给高密度养殖系统中的珊瑚提供一个最佳的饲养条件,营养来源一直是个重要的考量要素.对于与虫黄藻共生的珊瑚种类,共生藻光合作用产生的有机物是提供生长的重要来源<sup>[35]</sup>.然而,即使是造礁石珊瑚也需要摄食浮游生物以获得共生藻不能提供的必需氨基酸和其他营养<sup>[53-55]</sup>.在水产养殖业,卤虫(*Artemia* sp.)无节幼体和轮虫(rotifer)可为养殖对象提供氮、磷和必需氨基酸等营养源,进而促进其生长和生育<sup>[55-57]</sup>.对丛生盔形珊瑚<sup>[54]</sup>、地中海石珊瑚(*Cladocora caespitosa*)、萼柱珊瑚<sup>[57-61]</sup>等的多项研究也表明,以活体卤虫或轮虫为饵料,多数情况下可以提高具共生藻石珊瑚的钙化速率和生长率.来源于温带和亚热带的珊瑚,在不同季节接受的环境光照强度变化很大.研究表明,在光照较弱的季节,共生藻自养提供的有机物主要用于珊瑚虫与共生藻的呼吸消耗,而珊瑚生长所需要的能源主要来自异养<sup>[62]</sup>.在原地或异地繁育时,高温导致的珊瑚白化严重影响珊瑚的营养行为,会降低共生藻的光

合作用并减少宿主珊瑚的能量供应,而加强饵料供给可以在很大程度上补偿这种损害,提高珊瑚存活率<sup>[61]</sup>.有些珊瑚对异养营养需求强于光合自养,如大多数的软珊瑚和柳珊瑚等.它们通常以浮游植物、浮游动物、碎屑和游动很慢的无脊椎动物幼体为食物.浮游细菌和溶解有机物也是某些珊瑚的营养来源.有些水螅体很大的珊瑚(如杯状珊瑚 *Dendrophyllidae*)甚至可以捕食经过的鱼虾<sup>[60]</sup>.

相对于天然饵料,对珊瑚的人工饵料的研究更少.虽然市场上存有各种类型的珊瑚人工饵料,但这些人工作饵料的作用一般缺乏科学研究数据与证据,一些研究表明,多数商业人工饵料并不能提高珊瑚的生长率,反而可能引起水体富营养化及珊瑚白化<sup>[60]</sup>.

综上所述,尽管共生藻的光合作用可为宿主珊瑚提供部分或绝大部分能量需求,但异养营养的供应对人工珊瑚繁育非常重要.在保证适当的营养供应的条件下,许多种类珊瑚都可以从仅有几个水螅体的断枝成功繁育<sup>[16]</sup>.对于一些没有共生藻的非光合珊瑚(non-photosynthetic corals),如绝大多数柳珊瑚,食物更是决定珊瑚是否能够在人工养殖系统中存活的关键因素,也是维持长时间繁育的主要困难之一.

### 3.5 人工繁育珊瑚的病害研究

人工繁育体系中珊瑚的密度一般较自然生态系统高,病原的毒性和传染性会随密度增加而增加,因此,高密度的养殖往往导致这些珊瑚易受某些疾病的袭击,甚至威胁整个养殖体系.从印度-太平洋到加勒比海的各种珊瑚礁生态系统,疾病是目前造成珊瑚死亡的主要原因之一.这些疾病将不可避免地进入珊瑚养殖系统.

过去的几十年,野生珊瑚疾病的研究比较受关注,也取得了一定的成果.但这些成果主要集中在病状的描述和形态学分类,如组织漂白或斑点等颜色变化,组织融合度降低和大量细胞坏死等.对于绝大多数疾病的感染源以及受影响组织内发生的生理生化变化则知之甚少.许多研究试图为不同的珊瑚疾病分离到单一病原,但极少有成功的报道<sup>[62-65]</sup>.张季和潘连德<sup>[64]</sup>对观赏珊瑚常见疾病及影响因素研究的进展进行了综述,对比较常见的7种疾病:白化病、黑带病、白带病、白色瘟疫、白斑病、黄带病和曲霉病的病症、病原及致病机制等方面进行了介绍.王尔栋等<sup>[65]</sup>探讨了人工养殖鹿角珊瑚寄生虫栉水虱病害的防治.Sheridan 等<sup>[66]</sup>对养殖珊瑚疾病的病因、



影响以及防治等方面进行了综述,总结了现有珊瑚疾病的相关知识,珊瑚疾病病原学研究所存在的问题以及珊瑚是如何抵抗和防御疾病的;比较了原地和异地培育珊瑚疾病的起源和影响因子,以及天然和水族环境中与珊瑚密切联系的微生物群落的差异;还从政策、管理和好的做法,以及技术和遗传选择方面探讨了如何防治珊瑚疾病。

总的来说,关于珊瑚疾病的防治,目前取得的进展还相当有限,在原地繁育的条件下,目前尚无解决的办法;在异地繁育系统中,主要通过预防,包括使用人工海盐(或消毒海水)、珊瑚母株检疫、循环水体分隔、尽快移除病株等方式,减少病原进入繁育体系的概率<sup>[66]</sup>。一些已经明确病原体,如细菌 *Vibrio harveyi* 已经在进行治疗药剂的开发研究中<sup>[63]</sup>,针对病原的药物开发将是疾病防治的主要方向之一。

### 3.6 其他因素对珊瑚人工繁育的影响

对于珊瑚的生长和有性繁殖,温度也是重要的影响因素。寒潮或高温均会通过影响共生藻状态,使其从宿主脱落而导致珊瑚白化<sup>[67-69]</sup>。研究表明,海水温度升高会导致珊瑚白化、抗病力下降、性成熟失败、卵细胞排放减少等问题,而且成为珊瑚礁迅速退化的主要原因<sup>[70-72]</sup>。因此,在进行珊瑚人工繁育时,要注意不同种类珊瑚的最适温度及耐受温度。在人工环境下进行珊瑚繁育时,针对特定种类的珊瑚合理控制温度范围,对保证珊瑚断枝生存率、促进珊瑚生长以及诱导有性繁殖都具有重要意义。

除此之外,有学者报道了断枝大小对移植存活率的影响<sup>[18]</sup>、用于粘附断枝的粘合剂类型<sup>[70]</sup>,以及粘附基质的类型<sup>[35]</sup>对珊瑚断枝繁育效果的影响。Forsman 等<sup>[16]</sup>研究了两种在夏威夷广泛分布的造礁珊瑚(*Porites lobata* and *P. compressa*)与断枝大小有关的死亡率以及小断枝(只有 5 个水螅体)的生长情况,发现断枝生长与供体株大小呈正相关,而与死亡率则没有相关性。Dizon 等<sup>[72]</sup>研究表明,对于所研究的 12 种珊瑚,氰基丙烯酸酯粘合剂与粘附基质的脱离率明显高于环氧腻子 and 船用环氧树脂。Schlacher 等<sup>[35]</sup>对附着基质的研究表明,鹿角珊瑚(*Acropora solitaryensis*)在大理石和水泥基质上的生长没有差别。

## 4 我国珊瑚人工繁育研究的现状

国内珊瑚研究主要集中在珊瑚野生资源的调查<sup>[73-74]</sup>、保育<sup>[75-76]</sup>以及珊瑚活性物质的研究<sup>[77-81]</sup>方面。有关珊瑚人工繁育的信息多见商业水族机构

或珊瑚养殖爱好者之间的经验交流,科研机构对这方面的研究报道较少,主要是针对我国南海的石珊瑚类(Scleractinia)部分种属的无性繁育。已报道的种类包括鹿角珊瑚属(*Acropora*)<sup>[58,80]</sup>、蔷薇珊瑚属(*Montipora*)<sup>[81]</sup>、滨珊瑚属(*Porites*)<sup>[82]</sup>、盔形珊瑚属(*Galaxea*)<sup>[82]</sup>、管孔珊瑚属(*Goniopora*)<sup>[82-83]</sup>等的少数种类。珊瑚礁的生态修复是国内开展研究主要目的之一,如鲍鹰等<sup>[84]</sup>在海底珊瑚苗床上对粗野鹿角珊瑚(*Acropora humilis*)、霜鹿角珊瑚(*Acropora pruinosa*)和松枝鹿角珊瑚(*Acropora brueggemanni*)进行人工养殖,结果表明,这 3 种珊瑚可以在海底珊瑚苗床上常年生长;高永利等<sup>[85]</sup>对大亚湾造礁石珊瑚移植迁入地的选择及移植存活率进行了监测,在具有硬底质、良好的水质环境、适宜的水深、充足的珊瑚生长空间、无珊瑚病敌害生物及少有人为干扰与风浪破坏的适宜移植地,珊瑚移植一年后的存活率为 95.2%。较高的存活率反映出科学选择造礁石珊瑚移植地点是保护珊瑚资源的有力举措,该研究也为发展原地珊瑚繁育提供了参考。此外,还有一些人工模拟适宜条件选择的研究,主要探讨了在人工模拟海洋生态系统条件下,光照、温度、盐度、pH 值等理化因素<sup>[81-82,86-87]</sup>对石珊瑚断枝生长的影响。近年来,虽然活体珊瑚养殖在商业化水族市场的比重越来越大,但是国产活体珊瑚几乎完全来自于野外捕获;市场的需求与科研的现状存在脱节,针对满足市场需求的国产珊瑚繁育研究报道几乎没有;在珊瑚优良观赏性状筛选、良种培育、产业化等方面均为空白。在我国海域珊瑚的有性繁殖方面研究也较少,如黄洁英等<sup>[88]</sup>报道了造礁石珊瑚有性繁殖和幼体发育过程,为将来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。由于有性繁殖在珊瑚礁生态恢复、种群维持与发展等方面具有重大意义,开展重要珊瑚种类的有性繁殖生理、分子生物学理论研究与人工繁育实践,将成为我国海域珊瑚礁生态系统可持续性发展的重要内容。

## 5 总 结

综上所述,国外学者在珊瑚人工繁育领域进行了大量原地和异地的研究工作,涉及珊瑚的有性和无性繁殖技术。近几年在硬骨珊瑚人工繁育和有性繁殖方面也取得了重要进展。比较 2009—2011 年的数据,最大珊瑚出口国印度尼西亚已有 75% 的鹿角珊瑚源自人工繁育;生长缓慢、市场需求很大的真叶珊瑚(*Eupylluia* sp.)的人工繁育也已占出口总量的

20%<sup>[1]</sup>。随着我国经济的迅速发展和人民生活水平的提高,高端水族市场发展很快,对观赏珊瑚的需求日益增加。然而,由于我国珊瑚人工繁育工作的滞后,目前我国观赏珊瑚的来源主要为天然采集和国外进口。我国的福建、广东、广西、海南以及南海海域存在着丰富的石珊瑚资源,但由于环境恶化以及人们缺乏保护意识,珊瑚已遭到严重破坏。持续性的人工采集,对珊瑚礁环境破坏严重,不利于珊瑚资源及珊瑚礁生物多样性的保护。

珊瑚繁育技术的关键在于建立稳定的海水生态系统和了解不同珊瑚种类的生态需求。相对于自然水体,室内人工养殖系统的缓冲体系小、生物密度较高,对排泄物清除、降解及矿化速率要求比较高,因此,适应多数造礁石珊瑚的海水生态系统在室内循环水养殖系统中不易模拟。此外,生物多样性丰富的众多珊瑚品种,对光照、温度、水流和营养盐等理化因素有不同的需求,与虫黄藻共生的微妙关系也增加了绝大多数珊瑚品种的养殖难度。因此,开展珊瑚的人工繁育是涉及到人工培养生态体系的构建与维护、优良品种的选育与规模化养殖的多学科、多领域的系统工程。研究工作者应从构建室内珊瑚培养海水生态系统着手,根据不同珊瑚品种的环境需求和繁育特点,探索珊瑚繁育模式。

## 参考文献

- [1] Rhyne AL, Thlusty MF, Kaufman L. Is sustainable exploitation of coral reefs possible? A view from the standpoint of the marine aquarium trade. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2014, **7**: 101-107
- [2] Rhyne AL, Thlusty MF, Kaufman L. Long-term trends of coral imports into the United States indicate future opportunities for ecosystem and societal benefits. *Conservation Letters*, 2012, **5**: 478-485
- [3] Wabritz C, Taylor M, Green E, *et al.* From ocean to aquarium: The global trade in marine ornamental species. Cambridge, UK: UNEP-WCMC, 2003: 65
- [4] Jones R. CITES, corals and customs: The international trade in wild coral// Leewis R, Janse M, eds. *Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums*. Public Aquarium Husbandry Series, Vol. 2. Arnhem, the Netherlands: Burgers' Zoo, 2008: 351-361
- [5] Rhyne AL, Thlusty MF, Schofield PJ, *et al.* Revealing the appetite of the marine aquarium fish trade: The volume and biodiversity of fish imported into the United States. *PLoS ONE*, 2012, **7**: e35808
- [6] Franklin H, Muhando CA, Lindahl U. Coral culturing and temporal recruitment patterns in Zanzibar, Tanzania. *Ambio*, 1998, **27**: 651-655
- [7] Blunt JW, Copp BR, Keyzers RA, *et al.* Marine natural products. *Natural Product Reports*, 2012, **29**: 144-222

- [8] Blunt JW, Copp BR, Keyzers RA, *et al.* Marine natural products. *Natural Product Reports*, 2013, **30**: 237-323
- [9] Leal MC, Calado R, Sheridan C, *et al.* Coral aquaculture to support drug discovery. *Trends in Biotechnology*, 2013, **31**: 555-561
- [10] Rocha J, Peixe L, Gomes N, *et al.* Cnidarians as a source of new marine bioactive compounds: An overview of the last decade and future steps for bioprospecting. *Marine Drugs*, 2011, **9**: 1860-1886
- [11] Rinkevich B. Conservation of coral reefs through active restoration measures: Recent approaches and last decade progress. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**: 4333-4342
- [12] Shafir S, Van Rijn J, Rinkevich B. Steps in the construction of underwater coral nursery, an essential component in reef restoration acts. *Marine Biology*, 2006, **149**: 679-687
- [13] Heyward AJ, Smith LD, Rees M, *et al.* Enhancement of coral recruitment by in situ mass culture of coral larvae. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, **230**: 113-118
- [14] Petersen D. The role of sexual reproduction in captive population management: A review// Leewis R, Janse M, eds. *Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums*. Public Aquarium Husbandry Series, vol. 2. Arnhem, the Netherlands: Burgers' Zoo, 2008: 319-323
- [15] Petersen D, Laterveer M, Van Bergen D, *et al.* The application of sexual coral recruits for the sustainable management of *ex situ* populations in public aquariums to promote coral reef conservation - SECORE Project. *Aquatic Conservation*, 2006, **16**: 167-179
- [16] Forsman ZH, Rinkevich B, Hunter CL. Investigating fragment size for culturing reef-building corals (*Porites lobata* and *P. compressa*) in *ex situ* nurseries. *Aquaculture*, 2006, **261**: 89-97
- [17] Schopmeyer SA, Lirman D, Bartels E, *et al.* In situ coral nurseries serve as genetic repositories for coral reef restoration after an extreme cold-water event. *Restoration Ecology*, 2012, **20**: 696-703
- [18] Cairns SD. Asexual reproduction in solitary scleractinians. *Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium*, Australia, 1988: 641-646
- [19] Highsmith RC. Reproduction by fragmentation in corals. *Marine Ecology Progress Series*, 1982, **7**: 207-226
- [20] Calfo AR. *Book of Coral Propagation: Reef Gardening for Aquarists*, Vol. 1. 2nd Ed. Reading, PA: Reading Trees, 2007
- [21] Olivotto I, Planas M, Simões N, *et al.* Advances in breeding and rearing marine ornamentals. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2011, **42**: 135-166
- [22] Khalesi MK, Beertink HH, Wijffels RH. Flow-dependent growth in the zooxanthellate soft coral *Sinularia flexibilis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, **351**: 106-113
- [23] Osinga R, Schutter M, Griffioen B, *et al.* The biology and economics of coral growth. *Marine Biotechnology*, 2011, **13**: 658-671
- [24] Schutter M, van der Ven RM, Janse M, *et al.* Light in-

- tensity, photoperiod duration, daily light flux and coral growth of *Galaxea fascicularis* in an aquarium setting: A matter of photons? *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2012, **92**: 703–712
- [25] Wijgerde T, Henkemans P, Osinga R. Effects of irradiance and light spectrum on growth of the scleractinian coral *Galaxea fascicularis*: Applicability of LEP and LED lighting to coral aquaculture. *Aquaculture*, 2012, **344**: 188–193
- [26] Falkowski PG, Dubinsky Z, Muscatine L, *et al.* Light and the bioenergetics of a symbiotic coral. *Bioscience*, 1984, **34**: 705–709
- [27] Hoogenboom MO, Anthony K, Connolly SR. Energetic cost of photoinhibition in corals. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, **313**: 1–12
- [28] Frade PR, Bongaerts P, Winkelhagen AJS, *et al.* *In situ* photobiology of corals over large depth ranges: A multivariate analysis on the roles of environment, host, and algal symbiont. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**: 2711–2723
- [29] Kühl M, Cohen Y, Dalsgaard T, *et al.* Microenvironment and photosynthesis of zooxanthellae in scleractinian corals studied with microsensors for O<sub>2</sub>, pH and light. *Marine Ecology Progress Series*, 1995, **117**: 159–172
- [30] Lesser MP, Slattey M, Stat M, *et al.* Photoacclimatization by the coral *Montastraea cavernosa* in the mesophotic zone: Light, food, and genetics. *Ecology*, 2010, **91**: 990–1003
- [31] Venn AA, Loram JE, Douglas AE. Photosynthetic symbioses in animals. *Journal of Experimental Botany*, 2008, **59**: 1069–1080
- [32] Schutter M, van Velthoven B, Janse M, *et al.* The effect of irradiance on long-term skeletal growth and net photosynthesis in *Galaxea fascicularis* under four light conditions. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, **367**: 75–80
- [33] Rocha RJM, Serôdio J, Leal MC, *et al.* Effect of light intensity on post-fragmentation photobiological performance of the soft coral *Simularia flexibilis*. *Aquaculture*, 2013, **388**: 24–29
- [34] Rocha RJM, Calado R, Cartaxana P, *et al.* Photobiology and growth of leather coral *Sarcophyton cf. glaucum* fragments stocked under low light in a recirculated system. *Aquaculture*, 2013, **414/415**: 235–242
- [35] Schlacher TA, Stark J, Fischer ABP. Evaluation of artificial light regimes and substrate types for aquaria propagation of the staghorn coral *Acropora solitaryensis*. *Aquaculture*, 2007, **269**: 278–289
- [36] Osinga R. An example of public aquarium science: The CORALZOO project// Leewis RJ, Janse M, eds. *Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums*. Public Aquarium Husbandry Series, Vol. 2. Arnhem, the Netherlands: Burgers' Zoo, 2008: 167–171
- [37] Rocha RJM, Pimentel T, Serôdio J, *et al.* Comparative performance of light emitting plasma (LEP) and light emitting diode (LED) in *ex situ* aquaculture of scleractinian corals. *Aquaculture*, 2013, **402/403**: 38–45
- [38] Wijgerde T, van Melis A, Silva CIF, *et al.* Red light represses the photophysiology of the scleractinian coral *Stylophora pistillata*. *PLoS ONE*, 2014, **9**: e92781
- [39] Sebens KP, Helmuth B, Carrington E, *et al.* Effects of water flow on growth and energetics of the scleractinian coral *Agaricia tenuifolia* in Belize. *Coral Reefs*, 2003, **22**: 35–47
- [40] Sebens KP, Witting J, Helmuth B. Effects of water flow and branch spacing on particle capture by the reef coral *Madracis mirabilis* (Duchassaing and Michelotti). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1997, **211**: 1–28
- [41] Gardella DJ, Edmunds PJ. The effect of flow and morphology on boundary layers in the scleractinians *Dichocoenia stokesii* (Milne-Edwards and Haime) and *Stephanocoenia michilini* (Milne-Edwards and Haime). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2001, **256**: 279–289
- [42] Finelli CM, Helmuth BST, Pentcheff ND, *et al.* Water flow influences oxygen transport and photosynthetic efficiency in corals. *Coral Reefs*, 2006, **25**: 47–57
- [43] Jokiel PL. Effects of water motion on reef corals. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1978, **35**: 87–97
- [44] Sebens KP, Grace SP, Helmuth B, *et al.* Water flow and prey capture by three scleractinian corals, *Madracis mirabilis*, *Montastrea cavernosa* and *Porites porites*, in a field enclosure. *Marine Biology*, 1998, **131**: 347–360
- [45] Boch CA, Morse ANC. Testing the effectiveness of direct propagation techniques for coral restoration of *Acropora* spp. *Ecological Engineering*, 2012, **40**: 11–17
- [46] Szmant AM. Nutrient enrichment on coral reefs: Is it a major cause of coral reef decline? *Estuaries*, 2002, **25**: 743–766
- [47] Yuen YS, Yamazaki SS, Nakamura T, *et al.* Effects of live rock on the reef-building coral *Acropora digitifera* cultured with high levels of nitrogenous compounds. *Aquaculture Engineering*, 2009, **41**: 35–43
- [48] Girz A. The Zeovit system: A new concept in reefkeeping [EB/OL]. (2010-05-16) [2014-02-08]. [http://www.wetwebmedia.com/ca/volume\\_1/cav1i3/zeovit/Zeovit\\_system/zeovit.htm](http://www.wetwebmedia.com/ca/volume_1/cav1i3/zeovit/Zeovit_system/zeovit.htm)
- [49] Toh TC, Ng CSL, Guest J, *et al.* Grazers improve health of coral juveniles in *ex situ* mariculture. *Aquaculture*, 2013, **414**: 288–293
- [50] Ng CSL, Toh TC, Toh KB, *et al.* Dietary habits of grazers influence their suitability as biological controls of fouling macroalgae in *ex situ* mariculture. *Aquaculture Research*, 2013, **45**: 1852–1860
- [51] Petersen D, Laterveer M, Schuhmacher H. Spatial and temporal variation in larval settlement of reefbuilding corals in mariculture. *Aquaculture*, 2005, **249**: 317–327
- [52] Villanueva RD, Edwards AJ, Bell JD. Enhancement of grazing gastropod populations as a coral reef restoration tool: Predation effects and related applied implications. *Restoration Ecology*, 2010, **18**: 803–809



- [53] Crabbe MJC, Smith DJ. Modelling variations in corallite morphology of *Galaxea fascicularis* coral colonies with depth and light on coastal fringing reefs in the Wakatobi Marine National Park (SE Sulawesi, Indonesia). *Computational Biology and Chemistry*, 2006, **30**: 155–159
- [54] Hii YS, Soo CL, Liew HC. Feeding of scleractinian coral, *Galaxea fascicularis*, on *Artemia salina* nauplii in captivity. *Aquaculture International*, 2009, **17**: 363–376
- [55] Houllbrèque F, Tambutté E, Allemand D, *et al.* Interactions between zooplankton feeding, photosynthesis and skeletal growth in the scleractinian coral *Stylophora pistillata*. *Journal of Experimental Biology*, 2004, **207**: 1461–1469
- [56] Rainuzzo JR, Reitan KI, Olsen Y. The significance of lipids at early stages of marine fish: A review. *Aquaculture*, 1997, **155**: 103–115
- [57] Sorgeloos P, Dhert P, Candreva P. Use of the brine shrimp, *Artemia* spp., in marine fish larviculture. *Aquaculture*, 2001, **200**: 147–159
- [58] Wang E-D (王尔栋), Wang Z (王 钟), Chen G-H (陈国华), *et al.* Explore the prey mechanism of coral on biological live baits-type rotifer and *Artemia nauplii*. *Journal of Aquaculture* (水产养殖), 2014, **35**(1): 1–4 (in Chinese)
- [59] Reynaud S, Ferrier-Pages C, Sambrotto R, *et al.* Effect of feeding on the carbon and oxygen isotopic composition in the tissues and skeleton of the zooxanthellate coral *Stylophora pistillata*. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, **238**: 81–89
- [60] Tremblay P, Ferrier-Pagès C, Maguer JF, *et al.* Controlling effects of irradiance and heterotrophy on carbon translocation in the temperate coral *Cladocora caespitosa*. *PLoS ONE*, 2012, **7**(9): e44672
- [61] Hughes AD, Grottoli AG. Heterotrophic compensation: A possible mechanism for resilience of coral reefs to global warming or a sign of prolonged stress? *PLoS ONE*, 2013, **8**(11): e81172
- [62] Forsman ZH, Kimokeo BK, Bird CE, *et al.* Coral farming: Effects of light, water motion and artificial foods. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2012, **92**: 721–729
- [63] Sweet M, Jones R, Bythell J. Coral diseases in aquaria and in nature. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2012, **92**: 791–801
- [64] Zhang J (张 季), Pan L-D (潘连德). Study progress of disease and its influence factors of aquarium corals. *Information of Aquatic Science and Technology* (水产科技情报), 2011, **38**(2): 62–65 (in Chinese)
- [65] Wang E-D (王尔栋), Chen Y-Z (陈韵竹), Chen G-H (陈国华), *et al.* Study on the control of the asellus aquaculture disease on the husbandry of coral *Acoropora* sp. *Journal of Hainan Normal University* (Natural Science) (海南师范大学学报: 自然科学版), 2013, **26**(2): 208–213 (in Chinese)
- [66] Sheridan C, Kramarsky-Winter E, Sweet M. Diseases in coral aquaculture: Causes, implications and preventions. *Aquaculture*, 2013, **396**: 124–135
- [67] Baker A C, Glynn P W, Riegl B. Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **80**: 435–471
- [68] Burt J, Al-Harthi S, Al-Cibahy A. Long-term impacts of coral bleaching events on the world's warmest reefs. *Marine Environmental Research*, 2011, **72**: 225–229
- [69] Li S (李 淑), Yu K-F (余克服), Shi Q (施 祺), *et al.* Low water temperature tolerance and responding mode of scleractinian corals in Sanya Bay. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(9): 2289–2295 (in Chinese)
- [70] Yu K-F (余克服), Jiang M-X (蒋明星), Cheng Z-Q (程志强), *et al.* Latest forty two years' sea surface temperature change of Weizhou Island and its influence on coral reef ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(3): 506–510 (in Chinese)
- [71] Hughes TP, Baird AH, Bellwood DR, *et al.* Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 2003, **301**: 929–933
- [72] Dizon RM, Edwards AJ, Gomez ED. Comparison of three types of adhesives in attaching coral transplants to clam shell substrates. *Aquatic Conservation*, 2008, **18**: 1140–1148
- [73] Fu X-M (傅秀梅), Wang C-Y (王长云), Shao C-L (邵长伦), *et al.* Investigation on the status of coral reef resources and medicinal research in China. I. coral reef resources and ecological functions. *Periodical of Ocean University of China* (中国海洋大学学报), 2009, **39**(4): 676–684 (in Chinese)
- [74] Yang S-L (杨顺良), Zhao D-B (赵东波), Ren Y-S (任岳森), *et al.* Species composition and distribution of scleractinian corals discovered in the East Fujian waters. *Journal of Applied Oceanography* (应用海洋学报), 2014, **33**(1): 29–37 (in Chinese)
- [75] Zhang C-L (张成龙), Huang H (黄 晖), Huang L-M (黄良民), *et al.* Research progress on the effects of ocean acidification on coral reef ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(5): 1606–1615 (in Chinese)
- [76] Wu R (吴 瑞), Wang D-R (王道儒). Biodiversity protection status of coral reef in Hainan and research prospect. *Ocean Exploitation and Management* (海洋开发与管理), 2014, **31**(1): 84–87 (in Chinese)
- [77] Zhang W (张 文), Guo Y-W (郭跃伟). A pharmaceutical perspective on gorgonian: Chemistry and bioactivity. *Natural medicine in China* (中国天然药物), 2003(2): 69–75 (in Chinese)
- [78] Ai X-H (艾小红), Chen Y-X (陈亿新), Qi S-H (漆淑华). Recent progress in the chemical and pharmacological study of Chinese corals. *Journal of Guangzhou University* (Natural Science) (广州大学学报: 自然科学版), 2006, **5**(1): 49–56 (in Chinese)
- [79] Wang C-Y (王长云), Liu H-Y (刘海燕), Shao C-L (邵长伦), *et al.* Research progress on chemical defen-

sive substances from soft corals (*Sinularia flexibilis*) and Gorgonians (*Plexaura homoalla*). *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(5): 2320–2328 (in Chinese)

[80] Mou Y-L (牟奕林), Liu Y-J (刘亚军). Aquaculture of *Acropora aculeus*. *China Aquaculture* (中国水产), 2009(3): 27–30 (in Chinese)

[81] Wang E-D (王尔栋), Li H-W (李洪武), Chen G-H (陈国华), *et al.* Research on isolated artificial feeding of *Montipora foliosa* and environmental regulation of physical and chemical factors. *Journal of Hainan Normal University* (Natural Science) (海南师范大学学报: 自然科学版), 2012, **25**(4): 431–434 (in Chinese)

[82] Yang X-D (杨小东), Shen Y-C (申玉春), Liu L (刘丽), *et al.* Effect of temperature, pH and salinity on growths of three species of coral nubbins. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 2014(1): 53–59 (in Chinese)

[83] Mou Y-L (牟奕林), Liu Y-J (刘亚军). Aquaculture and slicing propagation of flower pot coral (*Goniopora lobata*). *China Aquaculture* (中国水产), 2009(7): 35–37 (in Chinese)

[84] Bao Y (鲍 鹰), Zhou X-J (周学家), Huang M-X (黄美霞), *et al.* Study of artificial culture of coral Acroporidae. *Maine Science* (海洋科学), 2012, **36**(1): 69–72 (in Chinese)

[85] Gao S-L (高永利), Huang H (黄 晖), Lian J-S (练健生), *et al.* Recipient site selection and hermatypic corals’ survival rate in Daya Bay, China. *Journal of Applied Oceanography* (应用海洋学学报), 2013, **32**(2): 243–249 (in Chinese)

[86] Yi Z-S (易祖盛), Yao B (姚 泊), Ye C-R (叶成仁), *et al.* Preliminary studies on breeding of corals and sea-anemone in man-made sea-water circulate filter system. *Supplement to the Journal of Sun Yatsen University* (中山大学学报论丛), 1997(1): 104–107 (in Chinese)

[87] Liu L (刘 丽), Li Z-P (李泽鹏), Shen Y-C (申玉春), *et al.* Study of stress of four environmental factors on *Porites lutea* and *Goniopora stutchburyi*. *Journal of Tropical Oceanography* (热带海洋学报), 2013, **32**(3): 72–77 (in Chinese)

[88] Huang J-Y (黄洁英), Huang H (黄 晖), Zhang Y-Y (张浴阳), *et al.* Embryonic and larval development of *Montipora turgescens* and *Acropora robusta*. *Journal of Tropical Oceanography* (热带海洋学报), 2011, **30**(2): 67–73 (in Chinese)

---

作者简介 王淑红,女,1969年生,副教授.主要从事海洋生物繁殖生理学及生态毒理学研究. E-mail: shwang@jmu.edu.cn

责任编辑 肖 红

---