

珊瑚礁生态修复研究进展

李元超^{1,2,3}, 黄 晖^{1,*}, 董志军^{1,3}, 练健生¹, 周国伟^{1,3}

(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, 广州 510301;
2. 中国科学院海南热带海洋生物实验站, 三亚 572000; 3. 中国科学院研究生院, 北京 10039)

摘要:珊瑚礁生态系统有着很高的生物多样性和重要的生态功能。20 世纪 80 年代以后全球范围内珊瑚礁的大面积退化引起了人们广泛的关注。简述了世界珊瑚礁资源现状, 破坏原因, 生态修复方法以及我国的珊瑚礁资源现状和修复策略等。国际上通用的生态修复策略主要是根据珊瑚的两种繁殖方式进行的, 此外再配合人为的适度干扰, 增加珊瑚的成活率。方法主要有: 珊瑚移植、Gardening、人工渔礁、底质稳固、幼体附着等以及对相关利益者的宣传, 海岸带的保护等。我国珊瑚礁退化严重, 但是由于缺乏相关的科技资料报道和技术支持, 缺乏系统的研究, 使得珊瑚礁的生态修复成绩甚微, 今后应在该领域开展更多的工作。

关键词:珊瑚礁; 珊瑚礁退化; 生态修复

文章编号: 1000-0933(2008)10-5047-08 中图分类号: Q16, Q178 文献标识码: A

Headway of study on coral reefs ecological restoration

LI Yuan-Chao^{1,2,3}, HUANG Hui^{1,*}, DONG Zhi-Jun^{1,3}, LIAN Jian-Sheng¹, ZHOU Guo-Wei^{1,3}

1 Key Laboratory of Marine Bioresources Sustainable Utilization, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2 National Experiment Station of Tropical Marine Biology, Sanya, Hainan Island, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 5047 ~ 5054.

Abstract: The world scale damage and retrogression of the coral reef have been in place for decades, especially the recent coral bleaching. Due to the abundant biodiversity and important ecological function of the coral reef ecosystem, it is vital to restore the damaged coral reef ecosystem. This paper summarizes the status of coral reefs of the world, global threats to the coral reefs, methods of coral reef restoration and recruitment, and the status of coral reefs of China. The strategy of coral reef restoration and recruitment usually depends on the ways of coral reproduction. In addition to improving the coral livability, sometimes intermediate disturbance is necessary. The methods of coral reef restoration and recruitment include coral transplantation, Gardening, artificial reefs, fixing the ground base, increasing the larvae adhesion and raising people's awareness on environmental protection. Coral reefs of South China Sea had been severely damaged, but the achievement was little and the related science and technology reports were scarce, so there is a long way to go in terms of strengthening the coral reef restoration and research.

基金项目: 中国科学院台站基金支持资助项目 (YTZJJ0502)

收稿日期: 2007-06-29; 修订日期: 2008-04-19

作者简介: 李元超 (1980 ~), 男, 山东荣成人, 硕士生, 主要从事珊瑚礁生物和生态研究. E-mail: lycouc@hotmail.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huanghui@scsio.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by the Field Station Foundation of Chinese Academy of Sciences (No. YTZJJ0502)

Received date: 2007-06-29; **Accepted date:** 2008-04-19

Biography: LI Yuan-Chao, Master candidate, mainly engaged in coral reef biology and ecology. E-mail: lycouc@hotmail.com

Key Words: coral reef; coral reef degeneration; ecological restoration

1 珊瑚礁资源现状以及破坏原因

1.1 珊瑚礁资源现状

现代珊瑚礁主要集中分布在印度-太平洋地区和加勒比海地区,并以印度-太平洋地区为主,大体分布在赤道两侧南北纬 30°之间。

2004 年的世界珊瑚礁调查报告^[1]指出全世界已经有超过 20% 的珊瑚礁被彻底破坏,并且没有进行过积极有效的珊瑚礁生态修复工作。1998 年气温异常升高导致全球 $\pm 16\%$ 的珊瑚礁死亡,不过现在这些区域的珊瑚礁已有大约 40% 的正在恢复或者已经恢复。由于来自人类的压力越来越大,据估计短期内将有 24% 的珊瑚礁环境状况令人担忧,如果从长远角度来看更有 26% 的珊瑚礁将遭受破坏。根据加勒比海近 30a 的珊瑚礁调查报告,认为珊瑚礁衰退的速度非常快,现在的状况和 30a 前的相差很大,许多礁区珊瑚覆盖率降低了 80%。此外,亚洲东南部和印度洋的珊瑚礁的生物多样性正在减少,而位于太平洋和澳大利亚周围的珊瑚礁的健康状况比较乐观^[1]。

1.2 珊瑚礁破坏的原因

导致珊瑚礁破坏的原因是多方面的,虽然珊瑚有一定的自我恢复能力,但是当破坏的速度超过其自我恢复的速度时,珊瑚礁就会逐渐衰退。影响珊瑚礁正常生长的主要因素有:海水升温、二氧化碳的浓度、臭氧的消耗和自然灾害等,以及破坏性的捕鱼方式、海水污染、珊瑚礁开采、旅游业等人为活动导致的生态环境破坏。

1.2.1 海水升温和珊瑚白化

随着化石燃料的大量使用和森林的大面积破坏,大气中二氧化碳和其他温室气体含量的增多,导致全球气候变暖。珊瑚对温度非常敏感,海水升温对珊瑚虫来说是非常危险的。海水升温会使珊瑚虫释放掉其体内的虫黄藻。虫黄藻是珊瑚的共生藻,其光合产物的 80% 以上提供给珊瑚,同时还给珊瑚带来了丰富的色彩,因此虫黄藻被释放后珊瑚就会出现不同程度的“白化”^[2]。

1.2.2 自然灾害

每年的飓风海啸都会对珊瑚礁造成破坏,生长数百年的珊瑚礁可能在瞬间被摧毁,需要数百年恢复,此外还有随时可能爆发的捕食珊瑚的海洋生物,如长棘海星等^[3]。

1.2.3 二氧化碳

在过去的几十年里,大气中的二氧化碳含量增加了近 1/3,这也增加了海水中溶解的二氧化碳,降低了海水的 pH 值。海水中大量的二氧化碳会降低碳酸根的浓度,降低 CaCO_3 、各种矿物(文石、方解石等)的饱和度,这些矿物都是珊瑚和其它海洋生物生长骨骼的材料。工业革命以前,海洋中的碳酸盐含量是现在的 3.5 倍,珊瑚很容易吸收和制造骨骼。随着海水中二氧化碳的增多,碳酸盐浓度越来越低,使得珊瑚等海洋生物富集碳酸盐的能力降低,珊瑚骨骼的钙化速率也降低。当海水中二氧化碳含量达到 $550\mu\text{mol/mol}$ 时,珊瑚等海洋生物将不能从海水中富集碳酸盐,珊瑚将不复存在^[4]。

1.2.4 破坏性的捕鱼方式

渔民为了眼前的利益经常采用一些极端的手段捕鱼,如使用氰化物,炸鱼等。

氰化物中毒之后,体型较大的鱼可以通过自身机体代谢处理掉氰化物,但是对于小型的鱼或是别的小型海洋生物如珊瑚虫来说,氰化物会导致它们畸形发育^[5]。

为了生存,渔民通常大量的捕鱼,但是不正确的捕鱼方式给珊瑚礁造成了毁灭性的破坏。敲击珊瑚礁会毁坏珊瑚的正常结构和功能,使用拖网拖鱼和炸药炸鱼,更会对珊瑚礁造成了毁灭性的破坏。

1.2.5 臭氧的消耗

由于 CFCs 等化学物质大量泄漏,臭氧层变得越来越薄。臭氧层的变薄会使到达海面的紫外线的强度和种类增加。虽然珊瑚有天生对抗热带日光的保护层,但是紫外线的增强还是会对浅水区域的珊瑚礁造成

破坏^[6]。

1.2.6 开采珊瑚礁

在很多地区珊瑚礁被用作建筑材料、建房或者铺路,也有被用来烧制石灰。此外,珊瑚还被用来制作纪念品,尤其是在一些发展中国家珊瑚被制作成装饰品,珠宝向游客兜售^[7]。

1.2.7 海水污染

许多研究已经证实海水污染是造成珊瑚礁退化的重要原因。海水有很多污染源,譬如石油,农药等。当人类向海洋中倾倒生活污水或工业废水,或是河流携带着污水流入珊瑚礁海域时,都会对珊瑚礁造成破坏。这些污水增加了珊瑚礁海域中营养盐的含量,促使藻类爆发,使珊瑚虫得不到足够的光照而死亡。

此外,沿岸进行的工程施工、采矿活动、伐木以及农业活动等都可能造成水土流失,雨水又将大量固体颗粒冲进海洋。大量的固体颗粒不仅阻挡了光线而且还会覆盖在珊瑚表面,阻止珊瑚虫呼吸^[8]。

1.2.8 旅游业

旅游区内的污水、垃圾如果处理的不好都会污染海水。此外,游客划船、潜水、钓鱼、船抛锚以及呼吸管,甚至于在珊瑚礁上的任何行走都可能会对珊瑚造成破坏,更不用说游客对珊瑚的采摘了^[7]。

2 珊瑚礁生态修复的研究进展

2.1 珊瑚移植

虽然珊瑚礁的生态修复一直没有特别行之有效的方法,但是在过去的十几年里,珊瑚移植还是在珊瑚礁的恢复中发挥了很大的作用,成为修复珊瑚礁的主要手段。珊瑚移植的主要研究工作就是把珊瑚整体或是部分移植到退化区域,改善退化区的生物多样性。学者们主要是研究了珊瑚移植的成活率及种的选择等问题,也有一些学者对可能影响珊瑚移植存活的因素进行了研究。

珊瑚移植最大的问题是珊瑚的来源。珊瑚移植需要大量的珊瑚,如果大量的采摘,会对供体珊瑚礁造成伤害,如果能进行人工养殖,不仅可以为珊瑚移植提供来源,而且还可以为水族市场和旅游业提供珊瑚,减少对珊瑚礁的压力。

目前珊瑚移植的主要研究工作有:(1)将整个珊瑚移植到退化区域^[9];(2)将枝状珊瑚的片断移植到退化区域^[10,11];(3)将块状珊瑚的碎片移植到退化区域^[12];(4)将珊瑚幼虫特定安放在退化区域^[13]。

也有一些学者对可能影响珊瑚移植存活的因素进行了研究:(1)珊瑚品种的选择^[14];(2)人工移植和自然恢复之间的比较^[15];(3)群落的构成^[16];(4)移植种类在原生境中所起到的作用^[17];(5)移植珊瑚的存活状况^[15];(6)不同底质对珊瑚移植的影响^[18]等。

针对珊瑚移植的研究,人们开始比较不同移植方法对珊瑚成活率的影响。但是后来发现由于影响珊瑚移植的因素很多,最后的参数很少相同,具有高变性,可比性很差。例如根据 Edwards^[19]的报道在夏威夷群岛,2a 过后移植到水泥底座上的 9 种珊瑚死亡率为 5% ~ 50% 不等。他又将珊瑚移植到 Armoflex 礁坪上的 3 个水泥底座,面积约为 20m²,这里主要是采矿造成珊瑚礁退化。在经历 28 个月的观察后发现,大部分珊瑚的死亡发生在最初的 7 个月,实验结束时移植的 530 个珊瑚存活了近 51%。相反的,在移植了 2150 个石珊瑚,428 个软珊瑚和 488 个海绵到墨西哥的 Cozumel 岛一个小区域后发现在 1 个月内死亡率仅为 3%^[19]。

Soong 和 Chen^[10]在台湾南部海区对比了各种因素对珊瑚移植影响的实验。鹿角珊瑚被养在浅水海域,通过比较新老珊瑚间骨骼的生长速率来分析各种因素对它们可能造成的影响。主要研究的变量有珊瑚的来源、最初的长度、组织伤害以及安放位置等,所有这些因素都会对珊瑚的生长造成影响。最后这些变量清楚的显示珊瑚有很大的几率依靠自身从一个小片断长到一个大的个体。研究还显示对鹿角珊瑚而言,小的珊瑚片断,例如 1cm,是不适合移植的,因为它们很容易被藻类覆盖或是被捕食者吃掉。另外,由于鹿角珊瑚的中轴没有活体组织,一旦污损生物在这些暴露的断面生长起来,就会阻止珊瑚的生长。同时,如果过多的取走供体珊瑚大的枝杈,那么在几年内它的繁殖率会很低甚至为零。研究还显示,4cm 的长度对鹿角珊瑚的移植来说是最合适的,同时新的枝杈会在珊瑚片断的切口处生长起来,所以比较长的珊瑚应该被切割以提供更多的

切口。

以色列的 Shafir 和 Rinkevich 等^[20]在红海建立了一个珊瑚养殖基地,一改传统的基地是固定在海底的做法,他们将基地悬浮在海水的某一个层次,这样既可以保证充足的阳光,还可以避免沉积物的影响,减少捕食者的捕食,改善水流环境等,取得比较好的效果。在新的模式下珊瑚生长比较快,小的珊瑚碎块或是断枝可以比较快的长到可以移植的大小,提高了珊瑚移植的成活率。

正确的珊瑚移植生态学管理还应该考虑到移植珊瑚的死亡率、存活率和移植珊瑚大小的关系。由于使用了不同的珊瑚种类、移植方案以及不同的移植环境,研究也会显示出不同的结果,但是大部分的结果都认为移植珊瑚的大小决定其存活率,然而也有一些研究表明没有确切的证据说明珊瑚的死亡率与移植片断的大小有关^[21]。尽管如此,现在大小决定存活率的观点已被广泛接受并应用于指导珊瑚的移植。

珊瑚移植虽然可以短时间内提高珊瑚的覆盖率,增加生物多样性,提高生物地貌,但是这并不适用于所有的珊瑚退化区,盲目的移植是无效的。Edwards^[19]在马尔代夫长达 5a 的实验后提出除非珊瑚的后备补充失败,否则珊瑚移植是不应被考虑的。同时他也比较了生长较快的分枝珊瑚和生长较慢的块状珊瑚在移植中的效率,最后发现虽然早期块状珊瑚生长较慢,覆盖率较低,但是存活率很高,在珊瑚移植中优于分枝珊瑚,这与人们为了追求短期的覆盖率而大量移植分枝珊瑚的观点是不同的。

适合进行珊瑚移植恢复的主要有以下几种情况:(1)受干扰的珊瑚区正处在优势种由石珊瑚向软珊瑚和微藻转变的过渡时期;(2)珊瑚区由于珊瑚幼虫的减少或是底质的不稳固导致其本身的后备补充不足;(3)存在大量的可移植珊瑚;(4)珊瑚区的水质适合珊瑚的生长等。所以移植前的评估是必要的,不合理的移植不但收不到预期的效果,还会对珊瑚的供体造成伤害。此外,移植以前还要把移植区域内的碎石移走,或是用水泥固定,以防它们在海浪的作用下对移植的珊瑚造成威胁^[19]。

2.2 Gardening 概念

尽管珊瑚移植已经被看作是恢复珊瑚礁生态的主要方法,但是这种方法需要大量的可移植珊瑚,并且珊瑚片断如果只是简单的固定,存活率很不确定。为了提高存活率需要移植较大的珊瑚片断,这对珊瑚礁是一种破坏,而且这种区域间的移植也可能会传播疾病,此外生境的突然改变也会对珊瑚的移植效率产生影响。为了减少或避免这类问题,Rinkevich^[22]提出了“Gardening coral reefs”这个概念。理论上就是在一个养殖场所进行珊瑚的养殖,把小的珊瑚断片或幼虫养到合适的大小再移植到退化区域。

将珊瑚安放在海底的养殖场所进行养殖,这种做法已经被广泛应用于珊瑚的恢复。最近在红海,学者们成功尝试了一种新的安放养殖场所的方法。他们将一个悬浮在水中的塑料网作为珊瑚的苗床(水面以下 6m,距海底 14m),这样可以大大改善养殖场所周围的环境,增强了水流、光照,减少了沉积物、藻类和捕食者的影响^[23]。

Gardening 概念提出以后,学者们对该策略的可行性、适应性以及其他一些细节进行了研究,发现在原位对珊瑚的断片、幼虫进行养殖,可以使它们有一个适应期,长到适合的大小,提高移植存活率。一个珊瑚的养殖场所也可看作是当地物种的一个源,为珊瑚礁管理提供无限的资源,可以帮助保存物种,防止生境退化,提高群落的多样性。“Gardening coral reefs”也为珊瑚礁的恢复提供了一个平台,认为珊瑚礁的碎石区可以作为珊瑚的养殖场所,将珊瑚断片培养成较大个体,这些珊瑚个体要么被用作提供珊瑚移植断片的新来源,要么被移植到退化区域。但是珊瑚礁的碎石区环境比较复杂,不是最理想的珊瑚礁养殖场所,Oren^[24]将一些固定在绳子上的 PVC 板用作珊瑚的养殖场,PVC 板的放置有水平的,有垂直的。珊瑚被移植到上面,结果显示垂直面的 PVC 板为珊瑚提供了最佳的生物和非生物环境,主要是因为垂直面沉积物比较少,覆盖的藻类相对也较少,被海胆等捕食的机会也较少,同时还缺少竞争物种。

“Gardening”概念已经被越来越多的应用于珊瑚的移植,虽然它也存在着一些潜在的破坏,但是这个概念的适应性已经得到证实,并被应用于很多的野外种。然而考虑到一些特定的地理位置,也为了能使不同种类的珊瑚适应多变的珊瑚礁环境,应该建立不同种类的方案。珊瑚养殖更重要的一点就是珊瑚个体长到一定程

度以后可以作为提供珊瑚断片新的来源,减少野生珊瑚礁的压力。此外,在原位养殖的珊瑚可以比较好的适应自然环境,为珊瑚移植提供较多的珊瑚资源;在非原位养殖的珊瑚可能从幼虫就开始适应这个区域,增加了移植个体的基因多变性。

2.3 人工渔礁

人工渔礁简单的说就是人工建造的具有三维结构的建筑物,安放到海底后为珊瑚等无脊椎动物和鱼类提供庇护所。当珊瑚礁的破坏程度非常严重,整个礁区的三维结构已经不存在时,传统的珊瑚移植已经不适合该礁区的恢复了。为了恢复受损的礁区,过去十几年里人们引进了人工渔礁,从最初的简单的投放到后来的和珊瑚移植结合。

人工渔礁一被提出就受到关注,因为它的工程简单,应用范围广。Pamintuan^[25]在菲律宾沿海投放了 32 个帐篷状的人工渔礁,很快就被无脊椎动物覆盖了,作者最后认为是由于这些无脊椎动物的幼虫具有避光性,人工渔礁为它们提供了这个环境。Abelson 和 Shlesinger^[26]针对人工渔礁的形状做了实验,一种是随机的形状,一种是人工设计的形状,随后每 4~6 个月做 1 次调查,4a 以后发现人工设计的渔礁除了比随机的渔礁吸引更多的鱼类以外,在珊瑚附着、生物量等方面都不如随机的渔礁。Ortiz-Prosper^[27]等设计了球形的人工渔礁-reef ball,但是 1a 以后只有很少的珊瑚幼虫附着。Clark 和 Edwards^[28]在马尔代夫投放了 360t 的水泥结构,总共有 4 个实验区,沿 1~2m 深的海岸线,每个实验区有 3 个 50m²的人工渔礁,3.5a 以后他们报道在比较大的人工渔礁上附着有 500 多个珊瑚,有些珊瑚的直径已经达到 25cm。

但是现在人工渔礁不再被看作是珊瑚礁修复的主要工具了,因为 Schuhmacher^[29]在跟踪调查了 20a 红海沿岸的人工渔礁后认为人工渔礁并没有改变受损区域的珊瑚礁结构,和周围受损礁区的珊瑚恢复情况相比,人工渔礁反而限制了该区域的珊瑚礁的修复。

2.4 稳固底质

珊瑚能否成活的很大一个因素是悬浮物的浓度,如果悬浮物浓度过高,不但影响到海水的透明度,阻挡光线,还可以沉积到珊瑚虫表面,使其窒息死亡。另外,一个相对稳定的底质对珊瑚礁的恢复是非常重要的,如果底质不稳定,附着的珊瑚幼虫可能会在碎石的滚动中脱落。国外在这方面主要的工作是用水泥把碎石区覆盖或者把碎石搬走。在许多珊瑚礁保护区,工作人员将活动的碎石用水泥等胶合在一起,固定底质,结果效果非常明显,被广泛应用于珊瑚礁的恢复工作中。它不仅增加了珊瑚自然恢复补充的速率,也使得珊瑚移植的成活率大大提高。

目前,除了简单的固定底质,研究人员还在底质中增加了一些化学物质($\text{CaCO}_3/\text{Mg}(\text{OH})_2$)和化学电位($<24\text{V}$),用以吸引珊瑚幼虫的附着和促进珊瑚生长。Sabater^[30]提出假说,认为在底质中增加 $\text{CaCO}_3/\text{Mg}(\text{OH})_2$ 电位,可以增加珊瑚对钙的富集,增加附近海水中钙盐的含量,同时影响珊瑚体内 ATP 电子连的传递,使其产生多余的能量,用来生长。Yap^[30]也认为在底质中增加电位可以使珊瑚体内的共生藻密度提高,同时提高珊瑚骨骼的生长率。此外,还有不少学者提出在底质中增加化学电位,可以诱导幼虫附着,提高存活率。

2.5 珊瑚幼体附着研究

珊瑚礁的修复虽然目前主要是靠珊瑚的移植,但是正如 Edwards^[19]所言,珊瑚礁的修复如果只是简单的依靠珊瑚的移植,收效并不十分明显,它只是针对破坏十分严重的无法依靠自身恢复的区域,对大部分珊瑚礁的恢复应当还是要依靠珊瑚自身的后备补充。

虽然珊瑚移植可以在短时间内提高群落的生物多样性,但是由于需要大量的珊瑚来源,这对供体珊瑚礁是一个伤害,同时还可能传播疾病,此外并不是每个珊瑚退化区都适合进行珊瑚移植,这就需要考虑珊瑚自身的补充-幼体附着。

珊瑚幼体的主要研究工作有:不同时间不同珊瑚卵巢、精巢的发育情况;珊瑚排卵的限制因子;珊瑚虫杂交;珊瑚幼虫的发育;珊瑚幼虫的附着;珊瑚幼虫的诱导发育;珊瑚幼虫死亡率;珊瑚幼虫来源;珊瑚幼虫的人工养殖等。

日本的 Heyward^[31] 设计了人工诱导珊瑚虫附着的模型,收集珊瑚精卵细胞进行受精发育,再使其附着在附着板上,成活后移植到受损区域,这种方法可以比较好的保护供体珊瑚,得到较多的珊瑚来源,在不破坏珊瑚礁的情况下对受损区域进行恢复,同时他们也作了很多关于不同附着基质的实验,最后发现陶瓦、陶瓷等材料比较适合用作珊瑚幼虫的附着基质。

对一些珊瑚退化区域来说,缺少的并不是珊瑚幼虫的来源,而是附着的基质。底质被大型藻类覆盖,或是被沉积物覆盖,幼虫找不到合适的附着基质而死亡。为幼虫提供合适的基质,为它们附着补充创造条件,可以在短时间内大面积的恢复受损区域。日本的 Okamoto 和 Nojima^[32] 在冲绳岛实验了各种材料对珊瑚幼虫的吸引,最后发现陶瓷和陶瓦是比较好的材料,其次是 PVC 板和水泥板,由于天然的礁石加工起来比较麻烦,不适合大规模的投放。

3 我国珊瑚礁资源现状及研究展望

我国的珊瑚礁主要集中分布在南中国海的南沙群岛、西沙群岛、东沙群岛,以及台湾省、海南省周边,少量不成礁的珊瑚分布在香港、广东、广西的沿岸,从福建省东山岛到广东省雷州半岛,从台湾北部钓鱼岛到广西涠洲岛。我国造礁石珊瑚物种丰富,占到世界造礁石珊瑚的 1/3,南海诸岛和海南岛是主要的分布区^[33],在广东广西大陆沿岸发现有 21 属 45 种,香港水域有 21 属 49 种,海南岛有 34 属 110 种和亚种,西沙群岛有 38 属 127 种和亚种,黄岩岛有 19 属 46 种,东沙群岛有 34 属 101 种,台湾海域有 58 属 230 种,太平岛有 56 属 163 种等。邹仁林系统整理了中国海域的造礁石珊瑚,认为共有 14 科 54 属 174 种^[34]。由于各种原因,中国的珊瑚礁破坏的已经相当严重。1984 年以前我国的珊瑚礁还处于良好的状态,珊瑚覆盖率可以达到 70% 以上。广东大亚湾珊瑚覆盖率在 1984 年调查为 76%,西沙永兴岛和海南三亚的珊瑚覆盖率也可以达到 70%。到 1990 以后,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。到 1991 年大亚湾的珊瑚覆盖率下降到了 32%,在 1994 年海南三亚的调查中也显示珊瑚覆盖率只有 38%,最近的 2002 年的调查显示海南三亚鹿回头的珊瑚覆盖率只有 19%,但是西沙群岛的永兴岛的珊瑚覆盖率依然可以达到很高的水平,可能是受人类活动影响比较小的缘故^[35]。

我国对珊瑚礁资源的重视比较晚,珊瑚礁保护区的建立也是上个世纪末和本世纪初才提上日程,先后建立了海南三亚珊瑚礁自然保护区(1990 年)、福建东山珊瑚礁自然保护区(1997 年)和广东徐闻珊瑚礁自然保护区(2003 年),广西涠洲岛也于 2001 年底初步组建了珊瑚礁海洋生态站,监测珊瑚礁生态系统的状况。到目前为止,我国的各个珊瑚保护区的管理还没有完善,大部分还是存在着缓冲区和核心区比例失调,旅游业对珊瑚保护区的压力过大等问题,管理部门对珊瑚的保护处于也初步阶段。

1995 年陈刚在三亚海域对造礁石珊瑚进行了移植性实验,可谓是我国最早的珊瑚礁资源恢复性研究^[36]。此后,南海海洋研究所和南海水产研究所更进一步,并于 2006 年和 2007 年对大亚湾的珊瑚礁成功进行了移植。相比国际珊瑚礁的恢复,我国这方面的研究还处于起步阶段,需要从多方面入手开展研究。

3.1 扩大保护区面积

目前最直接的保护方法就是阻止破坏,成立保护区,扩大保护区面积,可以保护珊瑚礁生态系统的生物多样性,减缓珊瑚礁的退化。正如 Epstein 在红海地区比较了不同大小的保护区对珊瑚礁恢复的影响,最后发现如果只是简单的隔离,只有大的保护区才能起到作用,小的保护区是起不到作用的^[37]。1975 年澳大利亚就成立了第 1 个珊瑚礁保护区,到 2004 年已经把保护区的面积扩大了 6 倍多。

3.2 加强保护区的管理,普及珊瑚知识

保护区不应只是简单的保护珊瑚礁生态系统,还应进行必要的修复研究。对保护区人员进行培训,进行基本的修复研究,如对长棘海星的防治,对石珊瑚的移植等。保护区还要处理好旅游和保护之间的关系,正确安排核心区和缓冲区,还要普及珊瑚知识,提高人们的保护意识。

3.3 加强珊瑚礁生态修复机制的研究

在对受损区域进行修复时,要考虑到该海域与石珊瑚来源海域的不同,增加过度期,减少移植珊瑚的死亡

率,另外在移植之前要进行必要的可行性评估。此外,还要考虑到移植珊瑚的基因问题,如果移植的珊瑚都是来自相近的母体,那么该海域的珊瑚基因库就非常小,在种类的进化、抵抗疾病、基因构建等方面会失去动力,同时还影响到当地种,引起较高的遗传漂变,当地种可能消逝。在遗传学方面进行的研究已经取得了一些有意义的结果,至少在珊瑚移植方面可以为移植种类的选择提供依据,可以更好的适应移植海域的气候、底质以及生物环境等。依据遗传学指导珊瑚礁恢复的策略在今后应该得到重视,在珊瑚礁的恢复中更好的发挥作用^[38]。

过去的十几年是珊瑚礁生态修复工作的第1个阶段,是从最初的理论到实践的阶段,目标也只是简单的替换死亡的珊瑚,今后除了重建以前的结构,还应力图恢复生态系统的功能。随着遗传学、分子生物学和理论生态学等学科的引入,会有更多的理论和方法被提出,相信今后我国珊瑚礁的生态修复工作会取得更加长远的成绩。

References:

- [1] Clive Wilkinson. Executive Summary. In: Clive Wilkinson ed. Status of coral reefs of the world;2004. Townsville, Queensland; Australia Institute of Marine Science Press, 2004. 7—50.
- [2] Gates R D. Seawater temperature and sub-lethal bleaching in Jamaica. Coral Reefs, 1990, 8:193—197.
- [3] Pratchett MS. Dynamics of an outbreak population of *Acanthaster planci* at Lizard Island, northern Great Barrier Reef (1995—1999). Coral Reefs, 2005, 24:453—462.
- [4] Hoegh-Guldberg O, Mumby P J, Hooten A J, *et al.* Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. Science,2007,318:1737—1742.
- [5] Helen Scales. Andrew Balmford and Andrea Manica. Impacts of the live reef fish trade on populations of coral reef fish off northern Borneo. Proceeding of the Royal Society Biology, 2007, 274:989—994.
- [6] Ilsa B, Kuffner. Effects of ultraviolet radiation and water motion on the reef coral, *Porites compressa* Dana; a transplantation experiment. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2002, 270:147—169.
- [7] Dulvy N K, Zhang K S. The exploitation of coral reefs in Tanzania's Mafia Island: the administrative dilemma. Ambio, 1995, 24(6):358—365.
- [8] Angela Dikou, Robert van Woesik. Survival under chronic stress from sediment load: Spatial patterns of hard coral communities in the southern islands of Singapore. Marine Pollution Bulletin,2006, 52:1340—1354.
- [9] Omori M, Aota T, Watanuki A, *et al.* Development of coral restoration method by mass culture, transplantation and settlement of coral larvae. Proceedings of the 1st Coral Reef Conference, Palao, 2004. 30—38.
- [10] Soong K, Chen T. Coral transplantation: regeneration and growth of *Acropora* fragments in a nursery. Restor. Ecol, 2003, 11:62—71.
- [11] Rinkevich B. Steps towards the evaluation of coral reef restoration by using small branch fragments. Mar. Biol., 2000, 136:807—812.
- [12] Van Treeck P, Schuhmacher H. Initial survival of coral nubbins transplanted by a new coral transplantation technology Options for reef rehabilitation. Mar. Ecol. Prog. Ser., 1997, 150:287—292.
- [13] Franklin H, Christopher A, Muhando A, *et al.* Coral culturing and temporal recruitment in Zanzibar, Tanzania. Ambio, 1998, 27: 651—655.
- [14] Becker L. C, Mueller E. The culture, transplantation and storage of *Montastraea faveolata*, *Acropora cervicornis* and *Acropora palmata*; what we have learned so far. Bull. Mar. Sci., 2001, 69:881—896.
- [15] Harrison P L, R C Babcock, G D Bull, *et al.* Mass spawning in tropical reef corals. Science, 1984, 223:1186—1189.
- [16] Connell J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. Science,1978, 199: 1302—1310.
- [17] Epstein N, Bak R P M, Rinkevich B. Applying forest restoration principles to coral reef rehabilitation. Aquat. Conserv., 2003, 13:387—395.
- [18] Yap H T. The case for restoration of tropical ecosystems. Ocean Coastal Manage, 2000, 43:841—851.
- [19] Edwards A J, Clark S. Coral transplantation: a useful management tool or misguided meddling? Mar. Pollut. Bull., 1998, 37:8—12.
- [20] Shafir S, Van Rijn J, Rinkevich B. Nubbing of coral colonies: a novel approach for the development of inland broodstocks. Aquat. Sci. Conserve., 2001, 3:183—190.
- [21] Yap H T, Alvarez R M, Custodio. Physiological and ecological aspects of coral transplantation. Mar. Biol. Ecol., 1998, 229:69—84.
- [22] Rinkevich B. Restoration strategies for coral reefs damages by recreational activities: the use of sexual and asexual recruits. Restor. Ecol., 1995, 3:241—251.
- [23] Rinkevich B. The coral gardening concept and the use of underwater nurseries: lessons learned from silvics and silviculture. In: Precht W. F. ed. Coral reef restoration handbook. CRC Press, 2006. 291—300.

- [24] Oren U, Benayahu Y. Transplantation of juvenile corals: a new approach for enhancing colonization of artificial reefs. *Mar. Biol.*, 1997, 127:499–505.
- [25] Pamintuan I S, Alino P M. Early successional patterns of invertebrates in artificial reef established at clear and silty areas in Bolinao, Pangasinan, Northern Philippines. *Bull. Mar. Sci.*, 1994, 55:867–877.
- [26] Abelson A, Shlesinger Y. Comparison of the development of coral and fish communities on rock-aggregated artificial reefs in Eilat, Red Sea. *J. Mar. Sci.*, 2002, 59:S122–S126.
- [27] Ortiz-Prosper A L, Bowden-Kerby A. Planting small massive corals on small artificial concrete reefs or coral heads. *Bull. Mar. Sci.*, 2001, 69:1047–1051.
- [28] Clark S, Edwards A J. Use of artificial reef structure to rehabilitate reef degraded by coral mining in the Maldives. *Bull. Mar. Sci.*, 1994, 55:724–744.
- [29] Schuhmacher H. Use of artificial reefs with special reference to the rehabilitation of coral reefs. *Bonner Zool. Monogr.*, 2002, 50:81–108.
- [30] Sabater M G, Yap H T. Growth and survival of coral transplants with and without electrochemical deposition of CaCO_3 . *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 2002, 272:131–146.
- [31] Heyward A J, Smith L D, Rees M, *et al.* Enhancement of coral recruitment by in situ mass culture of juvenile corals. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 2002, 230:113–118.
- [32] Omori M, Fujiwara S. Manual for restoration and remediation of coral reefs. Nature Conservation Bureau, Ministry of Environment, 2004. 1–84.
- [33] Zhao M X, Yu K F, Zhang Q M. Review on coral reefs biodiversity and ecological function. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1):187–194.
- [34] Zou R L. Fauna Sinica, Hermatypic coral. Beijing: Science Press, 2001. 1–289.
- [35] Huang Hui. Status Of Coral Reefs In China. Status of Coral Reefs in East Asian Seas Region; 2004. Ministry of the Environment, Japan, 2005, pp: 113–120.
- [36] Chen G, Xiong S L, Xie J N. A study on the transplantation of Reef-Building Corals in SanYa Waters, Hainan Province. *Tropic Oceanology*, 1995, 14(3):51–57.
- [37] Epstein N, Vermeij M J A. Alleviating impacts of anthropogenic activities by traditional conservation measures: can a small reef reserve be sustainably managed? *Biological Conservation*, 2005, 121:243–255.
- [38] Baruch Rinkevich. Conservation of Coral Reefs through Active Restoration Measures: Recent Approaches and Last Decade Progress. *Environment Science and Technology*, 2005, 39:4333–4342.

参考文献:

- [7] Dulvy N K, 张康生. 坦桑尼亚马菲亚岛的珊瑚开采:管理中的困境. *人类环境杂志*, 1995, 24(6):358–365.
- [33] 赵美霞, 余克服, 张乔民. 珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能. *生态学报*, 2006, 26(1):187–194.
- [34] 邹仁林. 中国动物志: 造礁石珊瑚. 北京: 科学出版社, 2001. 1–289.
- [36] 陈刚, 熊仕林, 谢菊娘. 三亚水域造礁石珊瑚移植实验研究. *热带海洋*, 1995, 14(3):51–57.