

全球变化背景下暖水珊瑚礁生态系统的适应性与修复研究

蔡榕硕, 郭海峡, ABD-ELGAWAD Amro, 牛文涛
(自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘要:暖水珊瑚礁生态系统是热带海域最具生物多样性和代表性的生态系统之一。本研究分析了全球变化背景下暖水珊瑚礁生态系统的变化和风险,开展了受损暖水珊瑚礁生态系统退化和消失的致灾因子归因分析,综述了暖水珊瑚礁生态系统的适应性与修复技术研究。分析表明:①过去几十年来,暖水珊瑚礁生态系统快速退化,包括大面积白化和死亡、多样性明显减少和生态功能显著衰退,主要归因于海洋升温与人类活动等致灾因子的影响;②在温室气体高排放浓度情景下(RCP 8.5),相比工业革命前,到本世纪中叶,南海升温将可能远超过 2 ℃,这表明南海暖水珊瑚礁生态系统正在逼近其气候临界点,即全球升温高于 2 ℃时,90%~99%以上的暖水珊瑚将消失;③1980 年代以来,海洋升温、海洋热浪和强热带气旋等海洋气候变化致灾因子对南海暖水珊瑚的危害性(影响的强度、范围和时间)明显增加,对暖水珊瑚礁生态系统产生了严重的影响;与此同时,近岸海域的过度或破坏性捕捞、采挖和潜水等人类活动,对暖水珊瑚造成了严重损害,增加了暖水珊瑚的气候脆弱性,而这种人类活动既是局部的,也是全球性的现象,使得暖水珊瑚更难以适应全球变暖的影响。分析还表明,为了增强暖水珊瑚适应气候与环境变化的恢复力(韧性),人们开展了诸多受损珊瑚礁生态系统的适应性与修复研究,但主要是采用无性繁殖或结合人工基质的修复方式,而应用有性繁殖技术恢复受损珊瑚礁的方式仍较少;最近,暖水珊瑚耐热的基因适应性研究取得了重要进展,为暖水珊瑚适应全球变暖提供了一种新的途径。本研究最后探讨了中国受损珊瑚礁生态系统的修复问题与对策。

关键词:海洋环境科学;全球变化;暖水珊瑚礁生态系统;风险;适应性;修复

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2021.01.002

中图分类号:P76

文献标识码:A

文章编号:2095-4972(2021)01-0012-14

暖水珊瑚礁是由造礁珊瑚、造礁藻类和其他造礁生物共同构建的,有岸礁、堡礁和环礁等多种类型,主要分布于南北纬约 30°之间的热带和亚热带浅水海域,大约占海洋底床面积的 0.1% (图 1)^[1]。其中,岸礁是紧邻海岸发育而成,堡礁则有与大陆架相连的基底,环礁是环状发育而成的珊瑚礁,中间为潟湖。例如,中国海南岛和涠洲岛等地的岸礁、澳大利亚的大堡礁以及中国西沙、东沙和南沙群岛的环礁^[2-3]。全球暖水珊瑚礁大约有 55% 分布于太平洋海域,如印度尼西亚、菲律宾、澳大利亚北部和中国南海等,约 30% 分布于印度洋,包括红海和波斯湾,

约 14% 分布于加勒比海和大西洋,1% 分布于南大西洋^[4]。中国拥有约 37 935 km² 的珊瑚礁,共有造礁石珊瑚 2 个类群 16 科 77 属 445 种^[5],分别占全球的 5% 和 50%^[3,6-8];其中,南海的珊瑚礁主要分布于中国大陆南方沿岸、海南和台湾岛^[9],以及南海的西沙、东沙、中沙和南沙群岛,并影响着南海约 3 000 000 km² 海域的地质、地貌和生态特征^[3,6-7]。

全球大约有 2.75 亿人口生活在距离珊瑚礁 30 km 的范围内^[10],珊瑚礁生态系统为人类社会提供了多种多样的服务,发挥着重要的作用,如海洋生物资源、渔民生计、建筑材料和海洋药物以及文化旅游

收稿日期:2020-07-28

基金项目:国家重点研发计划“全球变化及应对”专项资助项目(2017YFA0604902);自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2020001, 2020002)

作者简介:蔡榕硕(1964—),男,博士,研究员;E-mail: cairongshuo@tio.org.cn

娱乐等功能^[1,11]。其中,暖水珊瑚礁生态系统的渔业资源占热带海域国家渔获资源的10%~12%和发展中国家渔获资源的20%~25%^[12];并且,珊瑚礁可减缓热带气旋和风暴潮对海岸的破坏,保护海岛可居住的土地,包括红树林和湿地等生境以及海岸

沙滩。然而,近几十年来,全球变化背景下暖水珊瑚礁生态系统发生了显著的变化,包括大面积的白化和死亡、覆盖率和钙化率严重下降等退化现象,珊瑚礁生态系统对人类社会的重要作用也受到了很大的影响^[1,13]。

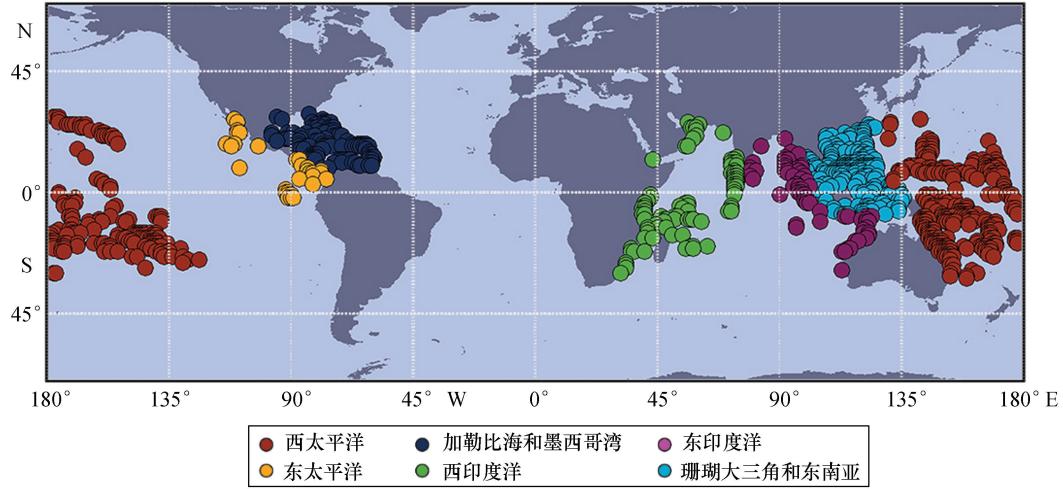


图1 全球暖水珊瑚礁分布图^[1]

Fig. 1 Global warm water coral reef distribution

为此,本研究首先分析了全球变化背景下近几十年来暖水珊瑚礁生态系统的变化及其面临严重退化的风险,评述了造成暖水珊瑚礁生态系统退化和消失的主要致灾因子及其危害性,讨论了暖水珊瑚礁生态系统的全球变化适应性,综述了世界上受损暖水珊瑚礁的主要修复方式,着重分析了若干种常见和有效的珊瑚修复技术以及存在的问题和改进的方向,探讨了在中国南海开展受损珊瑚礁修复的前景及其面临的挑战,以期为中国海域受损珊瑚礁生态系统的修复及其适应气候变化的影响提供科学参考。

1 全球变化背景下暖水珊瑚礁生态系统的变化及风险

工业革命以来,人类活动排放大量温室气体造成的气候变暖及其影响是全球变化的核心问题。特别是自20世纪50年代以来,人们观测到地球上的生态系统及生物多样性受到气候变暖的显著影响,发生了复杂的变化,如生物多样性的减少和生态系统服务功能的损失,已经并将继续对人类的生存和发展带来深远的影响^[14-15]。因此,全球变化不仅是气候与环境的问题,而且是国际社会普遍关注的重大政治、经济和外交问题。

在全球变化背景下,暖水珊瑚礁生态系统是热

带海洋中最具生物多样性和代表性的生态系统之一,近几十年来正在经历显著的变化。观测表明,暖水珊瑚礁生态系统处于快速的退化当中,造礁石珊瑚的覆盖率明显下降^[1];十多年前全球约有20%~30%的暖水珊瑚礁就已经消失,约50%的暖水珊瑚礁则处于严重的威胁和风险之中^[16-17]。研究表明,1980—2016年,暖水珊瑚礁生态系统经历了气候变暖背景下更为频繁的极端高海温事件(海洋热浪)的影响,并正在进一步恶化^[17],尤其是当前全球变暖背景下拉尼娜(La Niña)事件期间热带海表面温度(SST)甚至比30 a前厄尔尼诺(El Niño)事件期间更高,这导致珊瑚发生严重白化的间隔时间越来越短,使得珊瑚的恢复也变得更为困难^[18]。观测显示,仅2016、2017年的夏季,由于海洋热浪的影响,澳洲大堡礁的珊瑚覆盖率就减少了约一半^[19]。随着未来气候变暖的加剧,暖水珊瑚的白化将变得更为频繁^[18,20-22]。

2018、2019年,联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)相继发布的《全球升温1.5℃特别报告》和《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》^[20,22]指出,在不同气候情景下(如温室气体从中等浓度到高浓度排放情景,RCP4.5,RCP8.5),到21世纪末,几乎所有类型的海洋和海岸带生态系统将处于高或很高

的风险水平。其中,暖水珊瑚礁生态系统尤其严重,如果全球升温 1.5°C 和 2.0°C ,暖水珊瑚将分别消失 70%~90% 和 99% 以上^[20-23]。这表明暖水珊瑚礁生态系统正在逼近其气候临界点^[22-24]。评估结果虽然有一定的不确定性,但这仍然是一个令人非常不安的结论。这是因为当一个系统突破气候临界点后,很可能产生多米诺骨牌式的连锁效应,并引起其他系统突破临界点,从而可能导致其他生态系统陷入长期且不可逆的变化,进而影响人类的生存和发展等更为严重的后果^[24]。因此,暖水珊瑚礁生态系统如何适应全球变化,既关系珊瑚礁生态系统的存亡问题,也是当前人类社会可持续发展面临的重大挑战之一。

研究表明,过去 30 a 来,中国大陆和海南岛近岸珊瑚消失了约 80%,而在南海的近海环礁和群岛上,在 2012 年之前的 10~15 a 间,活珊瑚覆盖率从平均超过 60% 下降到了 20% 左右^[25](图 2)。调查表明,1984 年以前中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。然而,1990 年以后,随着中国沿海地区社会经济的发展和人类开发活动的加剧,珊瑚覆盖率迅速下降^[26]。例如,1983 年的广东省大亚湾珊瑚覆盖率为 77%,到 1991、2008 年分别下降至 32%、15%^[27]。1960 年海南省三亚市鹿回头岸礁的珊瑚覆盖率为 80%~90%,到 1994 年下降到 38%,到 2002 年和 2009 年,分别下降至 19% 和 12%^[28]。近二十多年来,广西北海市涠洲岛海域的珊瑚覆盖率也呈显著的下降趋势。1991—2010 年,涠洲岛东南部海域珊瑚覆盖率由 60.00% 下降到 17.58%,西南部海域从 80.00% 下降到 8.45%;2005—2010 年,北部海域由 63.70% 下降到 12.10%^[29]。中国南海的西沙群岛珊瑚礁也呈现明显的退化趋势。1980—2009 年,西沙群岛永兴岛珊瑚覆盖率从 90% 下降至 20%^[28]。2007—2016 年永兴岛造礁石珊瑚的种类数从 39 种减少至 18 种(下降率为 53.85%,下同),北岛的从 23 种下降到 17 种(26.09%),赵述岛的从 46 种下降到 12 种(73.91%),西沙洲的从 51 种下降到 15 种(70.59%)^[30]。相比全球暖水珊瑚礁的变化而言,中国南海珊瑚礁的平均退化速率高于全球平均值,局部区域退化的速率更高。

研究显示,1958—2018 年中国近海(0° — 45°N , 100° — 140°E)平均 SST 的线性增量为 $0.98 \pm 0.19^{\circ}\text{C}$,高于全球海洋平均增温($0.54 \pm 0.04^{\circ}\text{C}$)^[31-33];在温室气体高排放浓度情景下(RCP8.5),相比 1980—2005 年,到本世纪中叶,南海升温将超过 1.47°C ,未

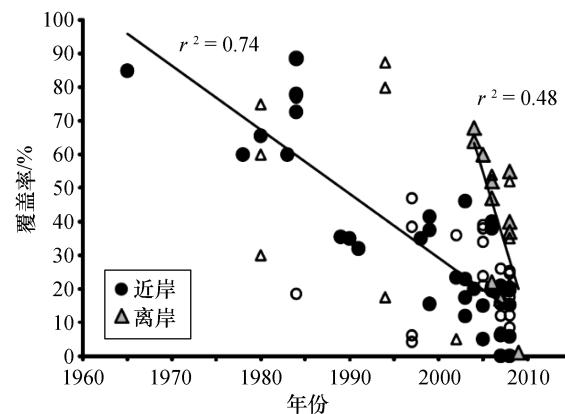


图 2 中国大陆近岸和南海离岸珊瑚覆盖率的变化^[25]

Fig. 2 Changes in the percentage of coral coverage on China's inshore reefs and offshore reefs of the South China Sea

图中圆心符号代表近岸调查点,三角符号代表离岸调查点。

来很可能成为全球热带海域升温幅度最高的海区之一^[34]。按上述中国近海升温线性速率的估算^[33],相比于 1958 年,到本世纪中叶,南海升温可能超过 1.93°C ;相比工业革命前,到本世纪中叶,南海升温很可能远超过 2.00°C 。并且,未来当全球平均温度上升 1.50°C 时,海洋热浪发生的频率将是当前(1982—2016 年)的 16 倍,如果全球平均温度升高 3.50°C ,这一频率将提高至 41 倍^[35]。由此可见,在气候变暖加剧的情景下,未来中国南海的海洋热浪将更强、更频繁,暖水珊瑚礁生态系统将更难以适应未来的全球变化,其健康和服务功能更是堪忧,可能将面临更高的全球变化综合风险。换言之,基于 IPCC 的评估结果和本文对南海升温的预估,到本世纪中叶,90%~99% 以上的南海珊瑚礁很可能面临消失的风险。

2 暖水珊瑚礁生态系统的适应性分析

随着全球海洋温度的升高,尤其是海洋热浪的频繁发生,暖水珊瑚礁生态系统将处于突变或不可逆变化的高风险之中^[20-24,36]。IPCC AR5 指出,与气候变化相关影响的风险来自于气候致灾因子的危害性(Hazard)与人类社会和自然系统的暴露度(Exposure)和脆弱性(Vulnerability)的相互作用^[36]。这是指当人类社会和自然系统暴露于气候变化致灾因子的影响时,由于人类社会和自然系统存在一定的脆弱性,从而可能发生系统结构和功能的损毁或损失,进而产生严重的影响或风险。其中,暴露度是指系统可能受到致灾因子危害性影响的范围和程度,脆弱性则是指系统易受致灾因子不利影响或损害的一

种状态,与其适应性和敏感性密切相关。其中,适应是为了趋利避害。在自然系统中,人为干预可能会促进对预期的气候及其影响的调整。因此,适应性主要指系统对气候变化及其影响和人类扰动的应对能力及其恢复能力^[36]。适应性与恢复力(Resilience,有时又称为韧性)密切相关。恢复力一般指系统应对致灾危害性事件或趋势,以维持其基本结构、功能和特性的方式作出的响应或重组,同时还保持适应、学习和转型的能力^[1,36]。换言之,重建或增强系统的恢复力将有利于减少其气候脆弱性,增强其应对气候变化影响的能力,从而降低灾害风险发生的可能性或严重性。

适应与减缓是当今国际社会应对气候变化的两大基本对策^[36-37]。前者指人类和自然系统适应气候变化的行动与措施,后者指国际社会减少排放温室气体的措施,遏制气候变暖的趋势。虽然采取减缓措施是解决气候变化及其影响的根本对策,但由于气候变化的巨大惯性,即使能够在短时间内快速控制温室气体的排放,气候变化及其影响如海温升高和海平面上升,仍将持续很长的时间,这使得适应措施的重要性愈显突出。前述分析表明,全球特别是中国南海的暖水珊瑚礁生态系统正在逼近其气候临界点^[18-22],因此,如何增强暖水珊瑚适应气候变化的能力就成为一个重大的科学问题。然而,无论是提高暖水珊瑚适应气候变化的速度,还是增强其应对气候与环境变化的适应性,厘清造成暖水珊瑚礁生态系统受损和退化的主要成因,包括致灾因子及其危害性,将有利于有针对性地克服适应措施的艰巨性和复杂性,从而做到有的放矢。

2.1 受损暖水珊瑚礁生态系统的归因分析

暖水珊瑚礁是由造礁珊瑚(珊瑚虫)分泌的碳酸钙构成的珊瑚礁骨架,当珊瑚虫死亡后,它们在骨架上积聚起来,其后代继续在这些骨架上成长繁殖,并通过堆积、填充和胶结各种生物碎屑,经过不断累积而形成^[2]。造礁珊瑚和虫黄(绿)藻的共生体系是其最基本的生态学特征。造礁珊瑚为虫黄(绿)藻提供了栖息环境和无机营养盐,而虫黄(绿)藻等共生体则通过光合作用为前者提供营养和能量。当这个共生体系受到外来胁迫致灾因子(如海温上升、海水酸化、光照减弱、海平面上升、热带气旋等海洋气候致灾因子,以及海水富营养化、过度或破坏性捕捞和围填海等人类活动致灾因子)的影响而发生变异或解体时,暖水珊瑚即可出现白化或死亡,导致暖水珊瑚礁生态系统的退化。一般地,外来致灾因子的胁迫越强,暖水珊瑚的退化就越快。其中,海温

的异常升高会影响乃至破坏珊瑚和虫黄藻的共生体系。同样,海水的酸化和富营养化也会影响共生体系的生存,并破坏珊瑚的正常生长发育,海水浑浊度的增加则影响共生藻的光合作用,而海平面上升的速率如果超过珊瑚的造礁速率,则会影响珊瑚礁的正常发育,从而影响其生存。

暖水珊瑚作为热带和亚热带海域的浅水生物,生活在水深50 m以浅的海域,其适温范围大约为18~29 °C。当海水温度较长时间超过这个范围将导致暖水珊瑚的虫黄藻等共生体逸出和珊瑚共生体系的崩溃,从而引起暖水珊瑚白化甚至死亡。自1980年代以来,全球频频发生的海洋热浪^[35],导致珊瑚频繁白化,增加了受损珊瑚恢复的难度,也改变了珊瑚礁生态系统的现状^[38]。例如,自1997年以来,强厄尔尼诺事件和海水温度异常升高事件导致大规模珊瑚白化事件的频繁发生。其中,1998年和2007年海水温度的异常升高更是引发了澳大利亚大堡礁和南海海域发生严重的大规模珊瑚白化和死亡^[1,6,17-18,38]。研究还发现,强热带气旋和长棘海星(*Acanthaster planci*)的暴发也给珊瑚带来严重的影响和破坏^[39-43]。近几十年来,全球变暖背景下强热带气旋如破纪录的(超)强台(飓)风不断增加^[44-47],其数量和强度对珊瑚礁结构的影响与破坏作用,超过了珊瑚礁长期以来形成的自然适应能力;并且,强台(飓)风-风暴潮造成的水体混浊度增加还将影响到珊瑚幼虫(体)的附着和生长发育。反过来,受损的珊瑚礁生态系统又削弱了珊瑚礁原来保护海岸的能力^[48-51]。此外,以珊瑚为食的长棘海星的暴发更是对其所到之处,如大堡礁和中国南海等局部海域的珊瑚带来灭顶之灾^[52-53]。

图3显示,1982—2012年,澳大利亚大堡礁珊瑚覆盖面积消失了50.7%,其中强热带气旋的影响[平均最大风速为32.8 m/s,大风(>17 m/s)平均时间为12.6 h]、长棘海星的暴发、珊瑚的白化在珊瑚死亡中的致灾比例分别占48%、42%、10%^[39,42]。分析表明,大堡礁海域长棘海星的暴发频率可能已从50~80 a一次增加到15 a一次^[52]。调查表明,2005—2019年,西沙群岛长棘海星的暴发周期大约为15 a;并且,自2018年以来,长棘海星的密度明显上升,从每公顷约400只增加到2019年的每公顷上千只^[53]。长棘海星暴发的原因还有待深入研究,有分析表明这可能与全球升温、营养盐和叶绿素a含量的增加、珊瑚礁鱼类减少以及人类活动等因素有关^[52-53]。

在气候变化和人类活动影响下暖水珊瑚礁已成为最脆弱的海洋生态系统之一,世界上50%以上的

珊瑚礁已处于中高或高退化风险之中^[1,10,13]。IPCC于2019年发布的《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》指出,自1997年以来,渐变的气候变暖叠加突发的海洋热浪增加了大规模珊瑚白化事件的频率,加快了世界范围内珊瑚礁生态系统的退化,有的已转变为以藻类为主的生态系统^[21,23]。然而,在暖水珊瑚礁经受气候变暖影响的同时,人类在珊瑚礁海域开展的破坏性或过度渔业捕捞、污染物排放、珊瑚

采挖、船舶锚泊、潜水娱乐和围填海等活动对暖水珊瑚礁生态系统也造成了严重的影响。虽然这些破坏性的活动是局部的,然而,却又是全球性的现象^[1,13,54-59]。这种人类活动不但影响暖水珊瑚的正常长发育,而且不同程度地破坏了珊瑚礁的物理结构,造成珊瑚礁生态系统服务功能的退化,增加了暖水珊瑚礁的气候脆弱性及其适应气候变化的难度。

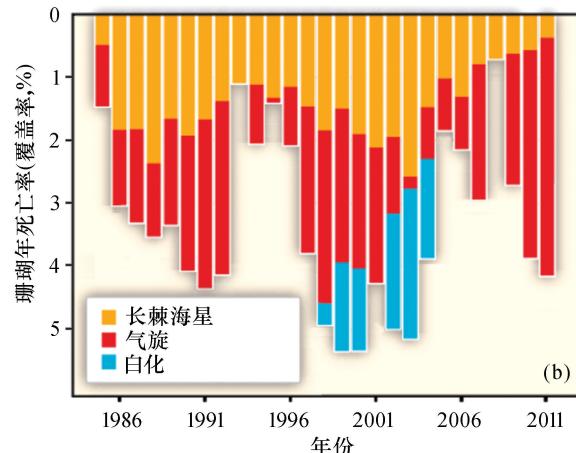
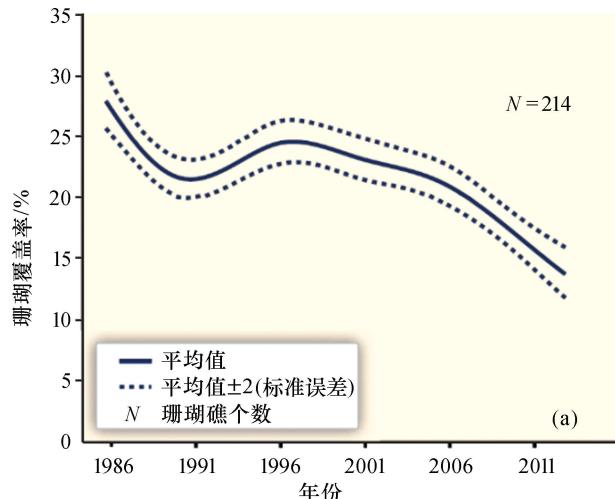


图3 1985—2012年澳大利亚大堡礁珊瑚覆盖率和每年死亡率的变化^[36,39]

Fig. 3 Temporal trend in coral cover and estimated annual mortality for the whole Great Barrier Reef, Australia over the period 1985–2012

(a):珊瑚覆盖率变化;(b):大堡礁珊瑚每年死亡率与长棘海星暴发、热带气旋发生和珊瑚白化造成的相对死亡率。

综上分析,造成暖水珊瑚礁生态系统退化或消失的主要致灾因子有:海温异常升高、海水酸化和富营养化、海平面上升、强热带气旋的增加、长棘海星和核果螺(*Drupella cornus*)等珊瑚摄食者的暴发,以及破坏性或过度捕捞、珊瑚/砗磲采挖、船舶锚泊、潜水娱乐和围填海等人类活动^[1,13,39,42,52-56,58-61]。限于篇幅,本研究主要关注较突出的两种致灾因子及其影响:一是,海温的异常升高,如1980年以来,海水的升温尤其是海洋热浪引起许多海域暖水珊瑚共生体系的崩溃,这是造成暖水珊瑚礁在某一个时段内发生大规模白化和死亡的主要原因;二是,人类在近岸珊瑚礁海域的破坏性活动,如采挖、船泊、过度捕捞、污染物排放和围填海等活动,直接导致珊瑚礁特别是岸礁结构的损毁,造成沿岸珊瑚礁生态系统的严重退化^[1,18,57]。为了提高暖水珊瑚礁生态系统适应气候变化的能力,减缓其逼近气候临界点的速度,避免生态系统的骨牌式连锁反应,世界各地开展了许多暖水珊瑚的适应性研究,以及受损珊瑚礁生态系统的恢复与重建等研究与探索。

2.2 受损暖水珊瑚礁生态系统的适应途径

一般地,物种为适应气候变暖,降低生存风险,主要有两种途径:一是,经过进化,提高其耐热性而适应气候变暖,耐热性差的物种因不适应温度升高而被淘汰;二是,为了适应温度的升高,物种向温度较低的极地方向或深水(高山)区迁移。同样,暖水珊瑚的适应性也主要取决于这两种至关重要的途径,即能否进化出适应气候变暖的珊瑚物种或者在地理空间上重新分布。换言之,珊瑚能否适应气候变暖,一是取决于物种的进化速度能否满足适应环境变化速度的要求^[62],二是取决于珊瑚群落在地理分布上的调整。研究发现,这种海洋生物群落的转变正在地理空间上发生。在暖温带海域,海洋变暖正在促使大型藻类群落向珊瑚群落的方向转变。例如,气候变暖使得温带日本近海的大型藻类群落将可能逐步演替为热带珊瑚和植(草)食性鱼类等群落^[63],这似乎揭示了气候变暖下暖水珊瑚的一种适应机制。然而,最近二三十年来,全球变暖尤其是频繁发生的高

温热浪,造成暖水珊瑚的大面积白化和死亡,生态系统明显持续退化,这表明暖水珊瑚的自然适应与恢复速度已赶不上气候变化的步伐^[64]。换言之,越来越多的证据表明,气候变暖的速度超过了珊瑚适应环境变化的速度。为此,人们开始关注珊瑚对环境热胁迫的响应及适应能力,并研究人工干预珊瑚耐热进化的可行性,探索提高珊瑚适应气候变化速度的新途径^[65-69]。最近研究发现,在实验室的高温条件下培养珊瑚的共生微藻,经过4 a大约120代的定向热进化后,再将其重新引入到珊瑚中,珊瑚将具有更强的热耐受性。这是迄今为止取得的一项重要进展,为暖水珊瑚适应全球变暖提供了一种新的途径;但是,这种人工干预潜在的风险还有待评估^[69]。

过去几十年来,人类活动对暖水珊瑚礁的直接损毁等破坏作用,加剧了珊瑚礁生态系统的退化和消失,严重削弱了其适应气候变化的能力。因此,除了应采取海洋环境保护与管理等措施之外,还需采取积极有效的珊瑚礁修复措施,才能有利于增强或重建珊瑚礁生态系统的恢复力,这也是增强珊瑚礁生态系统适应气候变化的重要行动。为此,多年来,人们在世界范围内开展了一系列修复受损珊瑚礁生态系统的探索和实践,大致采取了物理和生物的修复方式,或两者相结合的方法,前者以修复珊瑚礁生境为主,如修复受到破坏的珊瑚礁生物栖息环境,改善珊瑚的基底条件,为珊瑚礁生态系统的恢复创造条件;后者侧重于修复生物群落和生态过程,促进珊瑚礁生态系统结构和功能的自然恢复^[59]。这是因为对于遭到严重破坏的珊瑚礁生境特别是岸礁,如果不采取物理修复措施,即使经过几十年,受损的珊瑚礁也难以自然恢复;对于生物修复措施而言,如果当地环境条件良好,珊瑚退化面积小,则退化斑块有望在5~10 a内自然恢复;但是,如果当地环境条件很差,则需先采取环境保护管理措施,否则建立可持续珊瑚种群的机会微乎其微^[55]。

受损珊瑚礁恢复力的主要生物修复方式:一是,通过在海床上构建人工基质来改善珊瑚自然繁殖的条件^[59,70-71];二是,将珊瑚移植到退化生境中^[72-74],或者是这两种方法的结合^[70]。其中,人工珊瑚礁的修复技术得到了较为广泛的研究与应用^[56,75-80]。对于珊瑚礁生态系统的恢复而言,应始终考虑到拟修复的礁区环境是否有足够的珊瑚幼体补充量等条件,唯有在此条件下,才能构建一个有气候恢复力的当地珊瑚种群^[55]。因此,如何采取提高珊瑚礁的恢

复力(韧性),适应气候变化的能力,以及相关的人工干预措施也越来越受到关注。为此,本研究进一步综述常见的受损珊瑚礁的修复技术案例及其存在的问题。

3 受损暖水珊瑚礁生态系统的修复研究

3.1 受损暖水珊瑚礁生态系统的生物修复技术

在所有受损珊瑚礁生态系统的生物修复技术中,无论是采取珊瑚“移植”或是增加人工“基质”等措施,主要目的都是为了加速受损珊瑚礁生态系统的恢复,使其尽可能恢复到系统被扰动前的状态^[56,59,81]。对于受损珊瑚礁生态系统的“修复”而言,一般有“修复(Rehabilitation)”和“恢复(Restoration)”两种含意,前者强调对受损生态系统的人为重建与改进,侧重于人的主观能动性,而后者更强调受损生态系统自然恢复的属性^[82-84]。鉴于采用珊瑚无性或有性繁殖的修复是受损珊瑚礁最重要的生物修复方式之一,本研究仍采用“修复”泛指上述两种含意,但在细节上分别采用“修复”和“恢复”用来指代珊瑚无性移植和有性繁殖的修复,以突出前者人为的珊瑚无性移植修复特点,后者有性繁殖恢复的自然特征。当前受损珊瑚礁生态系统的生物修复大部分采用无性移植技术,而采用有性繁殖的恢复技术则较少。无性移植修复是指将成熟的珊瑚或珊瑚断枝和碎片移植到退化的珊瑚礁区,即从供体转移到受体珊瑚礁,使得珊瑚断枝或碎片重生,而有性繁殖恢复则是指珊瑚排卵至体外受精成为幼体,幼体在水体中漂流并附着在合适的基质上,进而自然生长发育成珊瑚,有利于增强珊瑚礁生态系统的恢复力。因此,有性繁殖恢复比无性移植修复更有利于珊瑚礁生态系统的自然恢复。一方面,这是因为有性繁殖增加了珊瑚种群之间的遗传多样性,有利于提高珊瑚生物群落的环境适应力和恢复力;另一方面,珊瑚幼体的增加也有利于加速受损珊瑚礁的自然恢复。然而,当前采用的有性繁殖恢复技术仍面临诸多的挑战,成功的案例仍较少^[75,85-86]。本研究综述了以下世界上受损珊瑚礁生态系统的若干修复案例^[56,59,86]。

3.2 受损暖水珊瑚礁生态系统的修复案例分析

表1为世界上10个受损珊瑚礁的物理与生物修复案例^[59]。这些案例主要采用了低成本且技术门槛较低的物理修复,或同时结合生物修复的方法。例如,采用稳定或重新固定珊瑚的基床、布放人工礁、采用浮动苗圃以及移植珊瑚等方式修复受损珊瑚礁生态系统。修复的时间跨度从数年至十多年不

等。除了以色列采用移植人工培育的珊瑚到退化的珊瑚礁盘外,大部分采用礁区环境的物理修复或进一步结合珊瑚移植的方式。总体来说,当前主要采用较低成本和较低技术门槛的方法来修复与保护珊瑚礁。

瑚生境,增加硬珊瑚的覆盖率和海洋生物的多样性,从而达到修复受损珊瑚礁生态系统的目的,这是当前国际上珊瑚礁修复技术及实践的基本现状^[59]。

表 1 世界受损珊瑚礁生态系统修复案例

Tab. 1 Restoration of damaged coral reef ecosystems around the world

序号	地点	修复时间	主要致灾因子及其危害性	修(恢)复方法
1	印尼	1998—2008 年	爆破捕鱼,损毁珊瑚礁	采用基底稳定方法,修复受损珊瑚礁
2	图瓦卢	2006—2008 年	过度生长的大型藻类和摄食珊瑚的核果螺暴发,造成大量枝状珊瑚消失	移植并培育新的珊瑚种群斑块
3	马尔代夫	2005—2008 年	1998 年强厄尔尼诺和疏浚等施工作业的影响,造成珊瑚白化,损毁珊瑚礁	采用金属架为基底,移植珊瑚
4	泰国普吉岛	1994—2007 年	风暴,损毁珊瑚礁,破坏珊瑚群落结构	采用复合人工礁,增强珊瑚和鱼类的繁殖
5	以色列	2005 年至今	沿海开发、港口活动、排污和潜水等人类活动,造成珊瑚礁退化	采用苗圃培育并将珊瑚移植到退化的珊瑚礁盘
6	波多黎各蒙纳岛	1997—2008 年	船舶触礁,损毁珊瑚礁	重新固定珊瑚断枝
7	日本琉球	2002 年至今	海温异常,引起珊瑚白化;摄食珊瑚的长棘海星暴发,造成珊瑚严重损失	清除长棘海星,采用人工陶瓷基质,移植珊瑚,修复珊瑚礁
8	斐济	2005.08—2006.05	海温异常,导致传统禁渔区内的珊瑚白化和死亡	移植珊瑚断枝或碎片
9	墨西哥	2007.05 至今	飓风,损毁珊瑚礁	采用人工礁,移植珊瑚断枝
10	菲律宾	2003.06—2005.07	爆破捕鱼,损毁珊瑚礁	采用塑料网稳固碎礁石基底,修复受损珊瑚礁

近年来,Doropoulos 等(2019)在澳大利亚大堡礁开展了规模化珊瑚有性繁殖恢复生态系统的研究^[86]。该研究主要基于大型船舶,将大堡礁海域的珊瑚受精卵抽取到船舶上的容器中培育成为珊瑚幼体,再由船舶运输至目标礁盘附近,通过管道释放珊瑚幼体,使之沉降并附着于目标礁盘上生长发育;或者将受孕的珊瑚收集于船舶上培育,在其排卵前移植到目标礁盘,使其经历产卵并培育出幼体直至成熟的珊瑚。在成本效益基本相似的情况下,前者比后者可收获到更多的珊瑚胚胎。这两种方法均有利于保护珊瑚基因和物种的多样性,但是前期需要大量经费的投入和较长时间的基础实验积累,能否与发展中国家的国情相适应尚有较大的不确定性。最近,Boström-Einarsson 等(2020)总结了 40 a 来 56 个国家珊瑚礁修复项目及其存在的问题^[56]。结果显示,大部分珊瑚礁修复项目为短期项目,修复规模相对较小,约为 100 m²,修复种类主要为快速生长的枝状珊瑚(59% 的项目),珊瑚存活率在 60% 到 70% 之间。存在的问题有:① 开展大型和长期修复项目的意愿低;② 许多修复项目的设计不佳,如缺乏控制实验或选择的参考系统不当等;③ 缺乏对修复项

目的充分和持续的跟踪监测;④ 缺乏关于项目进展和结果的报告;⑤ 许多项目面临着空间和时间尺度不断扩大的挑战。这可能限制了修复的效果,这些问题值得我们在开展修复受损珊瑚礁时加以借鉴和参考。

中国最早的珊瑚修复研究可能是始于 1993 年,陈刚等(1995)在海南省三亚市应用人工礁技术开展的造礁石珊瑚的移植实验^[87]。目前受损珊瑚礁的修复主要有以下方法:将珊瑚有性繁殖获得的个体、野外(海域)收集的珊瑚、野外或半原位(岸基)人工苗圃培育的珊瑚断枝移植到退化的珊瑚礁区和人工礁基质上,或者是多种方式的结合。采用移植修复的方式可较快地增加珊瑚的数量,这也是中国受损珊瑚礁较为普遍的修复方式^[58,87-88]。总体而言,过去 30 a 来,在中国南海、海南省三亚市和三沙市、广东省大亚湾、广西北海市涠洲岛等海域开展了许多珊瑚礁修复工作,但及时且充分的长期跟踪监测评价和发表的相关论文仍较少^[58]。为了解近年来我国近岸海域珊瑚礁的变化和修复现状,本研究作者于 2019—2020 年间在海南省三亚市红塘湾和广西北海市涠洲岛等地的沿岸珊瑚礁海域开展了多

次调查。调查发现,受损珊瑚礁特别是有的岸礁虽然表面主要归因于人类活动的影响,如三亚市红塘湾中围填海项目的悬浮泥砂对附近珊瑚礁生境及珊瑚的影响[图4(a)、(b)],但气候变化致灾因子如海温异常或台风叠加人类活动对涠洲岛海域的珊瑚礁也有严重的影响^[61],如涠洲岛西部海域石珊瑚碎枝、碎石和碎屑的分布现状反映了该海域珊瑚礁遭受多次台风的严重破坏性影响[图4(c)、(d)]。这也表明近岸受损珊瑚礁的归因分析还有待深入,而受损珊瑚礁,包括珊瑚生物群落演替或生境退化的原因分析是我们开展受损珊瑚礁生态系统修复的前提条件。调查还表明,珊瑚无性移植可能是我国目

前受损珊瑚礁的主要修复手段。例如,在海底构建珊瑚苗圃或采用半原位人工苗圃等方式培育珊瑚苗,或者采集野外的珊瑚断枝碎片,再将珊瑚移植到人工礁或受损的珊瑚礁。但这种修复方式面临着珊瑚移植或采摘引起的生物多样性退化,可能并不十分有利于充分保持物种基因的连通性和遗传的多样性。另外,这种修复还需要大量的人工水下施工作业,在开展规模化修复方面的难度也较大。因此,基于维护珊瑚礁生态系统及生物多样性的原则,开展降低受损珊瑚礁生态系统的气候脆弱性,尽快地提高受损珊瑚礁生态系统的恢复规模和速度,以增加其适应气候变化恢复力的修复工作已迫在眉睫。

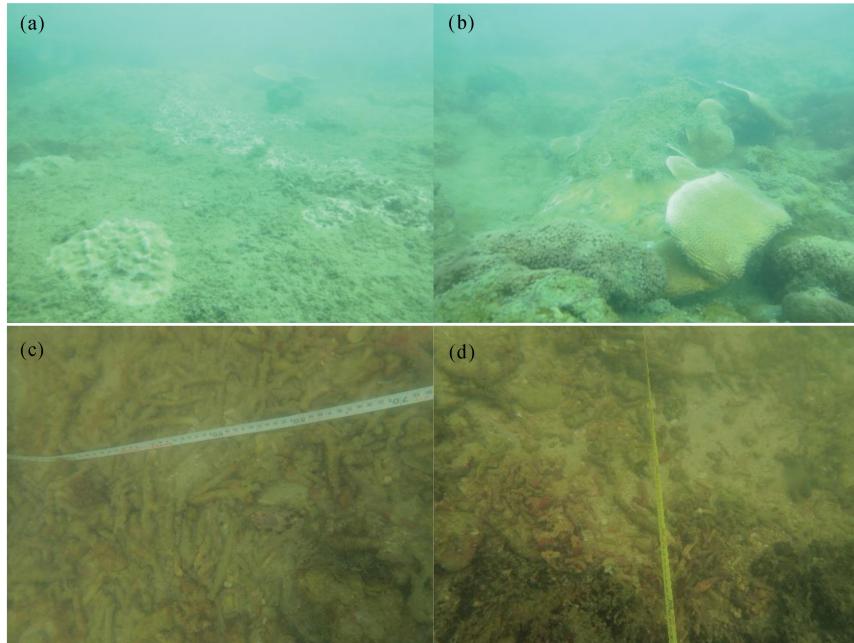


图4 受悬浮物和台风影响的珊瑚礁

Fig. 4 Coral reefs affected by suspended solids and typhoon

图(a)、(b)为海南省三亚市红塘湾近岸海域受人为悬浮物影响的珊瑚礁,由郭海峡 2019 年 10 月 23 日摄于水下;图(c)、(d)为广西北海市涠洲岛西部近岸海域受台风影响的造礁石珊瑚(断枝和碎块),由 ABD-ELGAWAD Amro 2020 年 7 月 6 日摄于水下。

4 结论与展望

4.1 结论

本研究分析了全球变化背景下暖水珊瑚礁生态系统的变化及其面临的影响与风险,开展受损暖水珊瑚礁生态系统退化或消失的归因分析,梳理了受损暖水珊瑚礁的主要致灾因子及其危险性,阐述了暖水珊瑚礁生态系统适应全球变化的主要途径,综述了受损珊瑚礁生态系统的修复问题,得到了以下几点结论:

(1) 在全球变暖背景下,近几十年来暖水珊瑚礁生态系统正在经历大面积白化和死亡、多样性明

显减少和生态服务功能的显著衰退,这主要归因于气候变暖背景下海洋的升温尤其是 1980 年代以来海洋热浪的频繁发生,而珊瑚礁海域的过度或破坏性捕捞、采挖和潜水等人类活动虽然是局部的,但也是全球性的现象,加剧了受损珊瑚礁生态系统的退化,使其更难适应气候变化的影响。随着公众保护海洋生态意识的提高,近年来人为破坏珊瑚礁的活动已得到了一定程度的扼制。

(2) 在未来不同气候情景下(如温室气体从中到高排放浓度情景, RCP4.5, RCP8.5),暖水珊瑚礁生态系统正在面临不可逆的影响和严重退化的风险。基于 1958—1998 年中国近海升温的线性速率

估算^[31],相比工业革命前,到本世纪中叶,中国南海升温很可能远超过2℃。换言之,南海暖水珊瑚礁生态系统很可能正在快速逼近其气候临界点,即全球升温2℃时,90%~99%以上的暖水珊瑚将消失;并且,令人担忧的是,一旦暖水珊瑚礁生态系统突破气候临界点,可能不仅是暖水珊瑚礁生态系统将发生崩溃,而且恐将引起其他生态系统的骨牌式连锁反应,从而可能对人类社会的可持续发展造成严重的冲击。

(3)为减缓或避免暖水珊瑚礁生态系统逼近气候临界点的速度与可能,增强暖水珊瑚适应气候与环境变化的能力,修复受损珊瑚礁生态系统是当今人类社会迫在眉睫之事。目前,世界范围内受损珊瑚礁生态系统的修复主要采用无性繁殖或结合人工基质的修复方式,而有性繁殖恢复受损珊瑚礁生态系统的方式仍较少。值得注意的是,最近暖水珊瑚耐热的适应性研究取得了重要进展,这为人们应用基因工程增强暖水珊瑚礁生态系统的恢复力提供了一种重要的可能途径,但人工干预存在的风险仍有待进一步的评估。

4.2 展望

IPCC AR5指出,适应措施是增强自然-社会生态系统的恢复力及其应对气候变化影响的主要方法之一,但由于适应措施是基于特定的背景,并没有一种可以降低所有风险的普适方法。因此,适应策略需要考虑生态系统的脆弱性和暴露度的动态变化及其与社会经济进程、可持续发展及气候变化的关系^[36]。鉴于中国海域暖水珊瑚礁生态系统面临的全球变化影响和风险,如何尽快地增强中国受损珊瑚礁生态系统的恢复力,提高其适应气候变化的能力,既是当前的重要科学问题,也是海洋生态文明建设的需求。

基于IPCC气候变化的综合风险理论^[36],为降低未来全球变化对暖水珊瑚礁生态系统造成的影响和风险,除了应进一步加强受损暖水珊瑚的主要致灾因子危害性和全球变化适应性的研究外,还需从宏观和微观角度出发,加强中国海域珊瑚礁生态系统的暴露度和脆弱性研究。包括从分子生物学层面

上,深入认识暖水珊瑚对气候与环境变化胁迫的响应与适应机制,如珊瑚的耐热、耐酸以及控制细胞死亡、免疫和修补等基因的变化^[89-91],并从地理空间层面上,认知暖水珊瑚礁生态系统的暴露度和脆弱性的时空分布特征,如珊瑚礁分布区与海洋热浪的高发区和人类活动的干扰区,以及珊瑚幼体自然补充量的关系等^[1,83,92],从而为开展珊瑚适应全球变化的研究和受损珊瑚礁生态系统的修复提供必要的科学基础。

此外,受损暖水珊瑚礁生态系统的修复还是一项系统且复杂的工作。例如,珊瑚幼体定期自然补充量及繁育是开展有性繁殖恢复的重要条件之一^[55, 84]。然而,长棘海星和核果螺等珊瑚摄食者,以及大型藻类或海草等对珊瑚(幼体)具有种间竞争优势,但通过生境的修复并创建有利于礁区鱼类群落聚集的环境,如水下声环境^[93-94],可吸引植食性或其他捕食长棘海星幼体的鱼类如苏眉鱼(*Cheilinus undulatus*)、鹦嘴鱼(*Scarus* spp.)等,从而抑制长棘海星等珊瑚摄食者的暴发和大型藻类及海草的过度生长。与此同时,还需要严禁礁区海域的破坏性和过度性渔业捕捞、控制污染物排放及过度的潜水或其他对珊瑚礁生境有显著干扰的人类活动。值得注意的是,开展受损珊瑚礁生态系统的修复研究和实践时,还应尽可能保障对修复项目的充分和持续的跟踪监测,并及时总结反馈修复中存在问题,用以指导后续的修复工作。

综上所述,受损暖水珊瑚礁生态系统的修复需要从生态系统结构和功能的整体性出发,符合“自然恢复为主,人工干预为辅”“基于自然的解决方案”等理念^[95],采用较低成本和较低技术门槛且易于推广的有性繁殖修复,可有利于大范围地重建受损珊瑚礁生态系统的恢复力,这是当前世界上非常重要且困难重重的研究课题。尽管如此,发展并推广这类技术有望在大范围内更好地恢复受损暖水珊瑚礁生态系统,并降低其面临的全球变化风险水平。

致谢:对郑新庆博士和罗肇河博士有关珊瑚礁修复和礁区藻类的有益讨论,在此谨表谢忱。

参考文献:

- [1] HOEGH-GULDBERG O, CAI R S, POLOCZANSKA E S, et al. The ocean. In: climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: regional aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014: 1 655-1 731.
- [2] 沈国英, 黄凌风, 郭丰, 等. 海洋生态学(第三版) [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 余克服. 珊瑚礁科学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.

- [4] SMITH S. Coral-reef area and the contributions of reefs to processes and resources of the world's oceans[J]. *Nature*, 1978, 273: 225-226.
- [5] 黄林韬, 黄晖, 江雷. 中国造礁石珊瑚分类厘定[J]. *生物多样性*, 2020, 28(2): 515-523.
- [6] 曾昭璇. 中国珊瑚礁地貌研究[M]. 广东: 广东人民出版社, 1997.
- [7] 王丽荣, 余克服, 赵焕庭, 等. 南海珊瑚礁经济价值评估[J]. *热带地理*, 2014, 34(1): 44-49.
- [8] HOEKSEMA B W, CAIRNS S. World list of scleractinia. 2020 [C/OL]. [2020-11-19]. <http://www.marinespecies.org/scleractinia>.
- [9] 孙松. 中国区域海洋学: 生物海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [10] BURKE L, REYTAR K, SPALDING M, et al. Reefs at risk revisited[M]. Washington, D C: World Resources Institute, 2011.
- [11] HOEGH-GULDBERG O. Coral reef ecosystems and anthropogenic climate change[J]. *Regional Environmental Change*, 2011, 11(1): 215-227.
- [12] GARCIA S M, DE LEIVA MORENO I. Global overview of marine fisheries[J]. *Responsible Fisheries in the Marine Ecosystem*, 2003: 103-123.
- [13] WONG P P, LOSADA I J, GATTUSO J P, et al. Coastal systems and low-lying areas. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge and New York, : Cambridge University Press, 2014: 361-409.
- [14] SALA O E, STUART CHAPIN III, JUAN J A, et al. Global biodiversity scenarios for the year 2100[J]. *Science*, 2000, 287 (5 459): 1 770-1 774.
- [15] TEAM C W, PACHAURI R K, MEYER L, et al. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Geneva: IPCC, 2014.
- [16] RIEGL B, BRUCKNER A, COLES S L, et al. Coral reefs: threats and conservation in an era of global change[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009, 1 162(1): 136-186.
- [17] HUGHES T P, KERRY J T, BAIRD A H, et al. Global warming transforms coral reef assemblages[J]. *Nature*, 2018, 556 (7 702): 492-496.
- [18] HUGHES T P, ANDERSON K D, CONNOLLY S R, et al. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene[J]. *Science*, 2018, 359(6 371): 80-83.
- [19] HUGHES T P, KERRY J T, CONNOLLY S R, et al. Ecological memory modifies the cumulative impact of recurrent climate extremes[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(1): 40-43.
- [20] IPCC. Summary for policymakers. In: global warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[M]. Geneva: World Meteorological Organization, 2018: 1-39.
- [21] BINDOFF N, CHEUNG W W, KAIRO J, et al. Changing ocean, marine ecosystems, and dependent communities, IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate[C/OL]. [2020-11-19]. <https://report.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-5/>.
- [22] IPCC. Summary for policymakers. In: IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate[M/OL]. [2020-11-19]. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/>.
- [23] 蔡榕硕, 韩志强, 杨正先. 海洋的变化及其对生态系统和人类社会的影响、风险及应对[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(2): 182-193.
- [24] LENTON T M, ROCKSTRÖM J, GAFFNEY O, et al. Climate tipping points: too risky to bet against[J]. *Nature*, 2019, 575 (7 784): 592-595.
- [25] HUGHES T P, HUANG H, YOUNG M A. The wicked problem of China's disappearing coral reefs[J]. *Conservation Biology*, 2012, 27(2): 261-269.
- [26] 李永祺. 中国区域海洋学: 海洋环境生态学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [27] CHEN T, YU K, SHI Q, et al. Twenty-five years of change in scleractinian coral communities of Daya Bay (northern South China Sea) and its response to the 2008 AD extreme cold climate event[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(12): 2 107-2 117.
- [28] SHI Q, LIU G H, YAN H Q, et al. Black disease (*Terpios hoshinota*): a probable cause for the rapid coral mortality at the

- northern reef of Yongxing Island in the South China Sea[J]. *Ambio*, 2012, 41(5): 446-455.
- [29] 王文欢, 余克服, 王英辉. 北部湾涠洲岛珊瑚礁的研究历史, 现状与特色[J]. *热带地理*, 2016, 36(1): 72-79.
- [30] 李元超, 陈石泉, 郑新庆, 等. 永兴岛及七连屿造礁石珊瑚近10年变化分析[J]. *海洋学报*, 2018, 40(8): 97-109.
- [31] CAI R, TAN H, KONTOYIANNIS H. Robust surface warming in offshore China seas and its relationship to the East Asian Monsoon wind field and ocean forcing on interdecadal time scales[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(22): 8 987-9 005.
- [32] 蔡榕硕, 谭红建, 郭海峡. 中国沿海地区对全球变化的响应及风险研究[J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(4): 514-527.
- [33] 蔡榕硕, 陈幸荣. 海洋的变化及其对中国气候的作用[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(9): 9-21.
- [34] TAN H, CAI R, HUO Y, et al. Projections of changes in marine environment in coastal China seas over the 21st century based on CMIP5 models[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2020, <https://doi.org/10.1007/s00343-019-9134-5>.
- [35] FRÖLICHER T L, LAUFKÖTTER C. Emerging risks from marine heat waves[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 650.
- [36] IPCC. Summary for policymakers. In: *climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects*. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014: 1-32.
- [37] IPCC. Summary for policymakers. In: *climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013: 1-29.
- [38] LOUGH J. 1997-98: unprecedented thermal stress to coral reefs? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(23): 3 901-3 904.
- [39] DE'ATH G, FABRICIUS K E, SWEATMAN H, et al. The 27-year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(44): 17 995-17 999.
- [40] HONGO C, KAWAMATA H, GOTO K. Catastrophic impact of typhoon waves on coral communities in the Ryukyu Islands under global warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117(G0209): 1-14.
- [41] BAIRD A H, PRATCHETT M S, HOEY A, et al. *Acanthaster planci* is a major cause of coral mortality in Indonesia[J]. *Coral Reefs*, 2013, 32(3): 803-812.
- [42] GATTUSO J P, HOEGH-GULDBERG O, PÖRTNER H O. Cross-chapter box on coral reefs. In: *climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014: 97-100.
- [43] WHITE K N, WEINSTEIN D K, OHARA T, et al. Shifting communities after typhoon damage on an upper mesophotic reef in Okinawa, Japan[J]. *PeerJ*, 2017, 5: e3573.
- [44] NAKAMURA J, CAMARGO S J, SOBEL A H, et al. Western North Pacific tropical cyclone model tracks in present and future climates[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(18): 9 721-9 744.
- [45] ZHANG L, KARNAUSKAS K B, DONNELLY J P, et al. Response of the North Pacific tropical cyclone climatology to global warming: application of dynamical downscaling to CMIP5 models[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(4): 1 233-1 243.
- [46] 蔡榕硕, 刘克修, 谭红建. 气候变化对中国海洋和海岸的影响、风险与适应对策[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(9): 1-18.
- [47] KOSSIN J P, EMANUEL K A, VECCHI G A. The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity [J]. *Nature*, 2014, 509: 349-352.
- [48] YATES K K, ZAWADA D G, SMILEY N A, et al. Divergence of seafloor elevation and sea level rise in coral reef ecosystems [J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(6): 1 739-1 772.
- [49] HARRIS D L, ROVERE A, CASELLA E, et al. Coral reef structural complexity provides important coastal protection from waves under rising sea levels[J]. *Science Advances*, 2018, 4(2): 1-7.
- [50] HIGHSMITH R C, RIGGS A C, D'ANTONIO C M. Survival of hurricane-generated coral fragments and a disturbance model of reef calcification/growth rates[J]. *Oecologia*, 1980, 46(3): 322-329.
- [51] DOROPOULOS C, ROFF G, ZUPAN M, et al. Reef-scale failure of coral settlement following typhoon disturbance and macroalgal bloom in Palau, Western Pacific[J]. *Coral Reefs*, 2014, 33(3): 613-623.
- [52] FABRICIUS K, OKAJI K, DE'ATH G. Three lines of evidence to link outbreaks of the crown-of-thorns seastar *Acanthaster planci* to the release of larval food limitation[J]. *Coral Reefs*, 2010, 29(3): 593-605.
- [53] 李元超, 吴钟解, 梁计林, 等. 近15年西沙群岛长棘海星暴发周期及暴发原因分析[J]. *科学通报*, 2019, 64(33):

- 3 478-3 484.
- [54] GLYNN P W. Widespread coral mortality and the 1982–83 El Niño warming event [J]. *Environmental Conservation*, 1984, 11 (2): 133-146.
- [55] EDWARDS A J, GOMEZ E D. Reef restoration: concepts and guidelines: making sensible management choices in the face of uncertainty [Z]. St Lucia: The Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, 2007.
- [56] BOSTRÖM-EINARSSON L, BABCOCK R C, BAYRAKTAROV E, et al. Coral restoration: a systematic review of current methods, successes, failures and future directions [J]. *PLoS ONE*, 2020, 15(1): e0226631.
- [57] HOEGH-GULDBERG O, MUMBY P J, HOOTEN A J, et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification [J]. *Science*, 2007, 318(5 857): 1 737-1 742.
- [58] ZHENG X, LI Y, LIANG J, et al. Performance of ecological restoration in an impaired coral reef in the Wuzhizhou Island, Sanya, China [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2020, <https://doi.org/10.1007/s00343-020-9253-z>.
- [59] EDWARDS A, JOB S, WELLS S. Learning lessons from past reef-rehabilitation projects, reef rehabilitation [Z]. St Lucia: The Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, 2010.
- [60] 黄晖, 马斌儒, 练健生, 等. 广西涠洲岛海域珊瑚礁现状及其保护策略研究 [J]. *热带地理*, 2009, 29(4): 307-312.
- [61] 梁文, 黎广钊, 张春华, 等. 20年来涠洲岛珊瑚礁物种多样性演变特征研究 [J]. *海洋科学*, 2010, 34(12): 78-87.
- [62] HOEGH-GULDBERG O. The adaptation of coral reefs to climate change: is the Red Queen being outpaced? [J]. *Scientia Marina*, 2012, 76(2): 403-408.
- [63] KUMAGAI N H, MOLINOS J G, YAMANO H, et al. Ocean currents and herbivory drive macroalgae-to-coral community shift under climate warming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(36): 8 990-8 995.
- [64] HUGHES T P, KERRY J T, BAIRD A H, et al. Global warming impairs stock-recruitment dynamics of corals [J]. *Nature*, 2019, 568(7 752): 387-390.
- [65] VAN OPPEN M J, GATES R D, BLACKALL L L, et al. Shifting paradigms in restoration of the world's coral reefs [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(9): 3 437-3 448.
- [66] VAN OPPEN M J, OLIVER J K, PUTNAM H M, et al. Building coral reef resilience through assisted evolution [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(8): 2 307-2 313.
- [67] DESALVO M, VOOLSTRA C, SUNAGAWA S, et al. Differential gene expression during thermal stress and bleaching in the Caribbean coral *Montastraea faveolata* [J]. *Molecular Ecology*, 2008, 17(17): 3 952-3 971.
- [68] MEYER E, AGLYAMOVA G, MATZ M. Profiling gene expression responses of coral larvae (*Acropora millepora*) to elevated temperature and settlement inducers using a novel RNA-Seq procedure [J]. *Molecular Ecology*, 2011, 20(17): 3 599-3 616.
- [69] BUERGER P, ALVAREZ-ROA C, COPPIN C W, et al. Heat-evolved microalgal symbionts increase coral bleaching tolerance [J]. *Science Advances*, 2020, 6(20): 1-8.
- [70] CLARK S, EDWARDS A. Coral transplantation as an aid to reef rehabilitation: evaluation of a case study in the Maldives Islands [J]. *Coral Reefs*, 1995, 14(4): 201-213.
- [71] THONGTHAM N, CHANSANG H. Influence of surface complexity on coral recruitment [Z]. Phuket: International Workshop on the Rehabilitation of Degraded Coastal Systems, 1998.
- [72] KALY U L, CENTRE C R R. Experimental test of the effects of methods of attachment and handling on the rapid transplantation of corals [R]. Townsville: CRC Reef Research Centre, 1995: 1-24.
- [73] YAP H T, ALINO P M, GOMEZ E D. Trends in growth and mortality of three coral species (Anthozoa: Scleractinia), including effects of transplantation [J]. *Marine Ecology Progress Series*. Oldendorf, 1992, 83(1): 91-101.
- [74] BOWDEN-KERBY A. Coral transplantation in sheltered habitats using unattached fragments and cultured colonies [C]//LES-SIOS H A, MACINTYRE I G. *Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium*. Panama: Smithsonian Tropical Research Institute, 1996: 2 063-2 068.
- [75] ABD-ELGAWAD A A, ABOU-ZAID M. Reef Dome, a novel model for coral reef rehabilitation [C]. Queensland: 12th International Coral Reef Symposium, 2012: 514.
- [76] MCDONALD T, GANN G, JONSON J, et al. International standards for the practice of ecological restoration: including principles and key concepts [Z]. Washington, D C: Society for Ecological Restoration, 2016.
- [77] LIRMAN D, MILLER M W. Modeling and monitoring tools to assess recovery status and convergence rates between restored and undisturbed coral reef habitats [J]. *Restoration Ecology*, 2003, 11(4): 448-456.
- [78] MILLER M W. Using ecological processes to advance artificial reef goals [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59(S1):

S27-S31.

- [79] ASELTINE-NEILSON D A, BERNSTEIN B B, PALMER-ZWAHLEN M L, et al. Comparisons of turf communities from Pendleton Artificial Reef, Torrey Pines Artificial Reef, and a natural reef using multivariate techniques[J]. *Bulletin of Marine Science*, 1999, 65(1): 37-57.
- [80] PATTERSON EDWARD J K, PATTERSON J, MATHEWS G, et al. Awareness raising and feasibility of reef restoration, through coral transplantation in Tuticorin, Gulf of Mannar, India[J]. *Coral Reef Degradation in the Indian Ocean (CORDIO) - Status Report*, 2005: 243-251.
- [81] HEIN M Y, WILLIS B L, BEEDEN R, et al. The need for broader ecological and socioeconomic tools to evaluate the effectiveness of coral restoration programs[J]. *Restoration Ecology*, 2017, 25(6): 873-883.
- [82] GANN GD M T, WALDER B, ARONSON J, et al. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition[R]. Washington, D C: Society for Ecological Restoration, 2019: 1-14.
- [83] 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.
- [84] ALASDAIR E, JAMES G, SHAI S, et al. Reef rehabilitation manual[Z]. St Lucia: Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, 2010.
- [85] ABD-ELGAWAD A A. Comparative study on growing of corals on artificial substrates as a tool for rehabilitation of reefs around Hurghada-Red Sea[D]. Cairo: Al-Azhar University, 2010.
- [86] DOROPOULOS C, ELZINGA J, TER HOFSTEDE R, et al. Optimizing industrial-scale coral reef restoration: comparing harvesting wild coral spawn slicks and transplanting gravid adult colonies[J]. *Restoration Ecology*, 2019, 27(4): 758-767.
- [87] 陈刚, 谢菊娘. 三亚水域造礁石珊瑚移植试验研究[J]. 热带海洋, 1995, 14(3): 51-57.
- [88] 高永利, 黄晖, 练健生, 等. 大亚湾造礁石珊瑚移植迁入地的选择及移植存活率监测[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(2): 243-249.
- [89] BERKELMANS R, VAN OPPEN M J. The role of zooxanthellae in the thermal tolerance of corals: a 'nugget of hope' for coral reefs in an era of climate change[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2006, 273(1 599): 2 305-2 312.
- [90] BARSHIS D J, LADNER J T, OLIVER T A, et al. Genomic basis for coral resilience to climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(4): 1 387-1 392.
- [91] POPOVICI R M, BETZLER N K, KRAUSE M S, et al. Gene expression profiling of human endometrial-trophoblast interaction in a coculture model[J]. *Endocrinology*, 2006, 147(12): 5 662-5 675.
- [92] FRÖLICHER T L, FISCHER E M, GRUBER N. Marine heatwaves under global warming[J]. *Nature*, 2018, 560(7 718): 360-364.
- [93] GORDON T A C, RADFORD A N, DAVIDSON I K, et al. Acoustic enrichment can enhance fish community development on degraded coral reef habitat[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5 414.
- [94] GORDON T A C, HARDING H R, WONG K E, et al. Habitat degradation negatively affects auditory settlement behavior of coral reef fishes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(20): 5 193.
- [95] COHEN-SHACHAM E, WALTERS G, JANZEN C, et al. Nature-based solutions to address global societal challenges[M]. Gland: IUCN International Union for Conservation of Nature, 2016: 1-97.

A study on the adaptation and restoration of warm water coral reef ecosystem in the context of global change

CAI Rong-shuo, GUO Hai-xia, ABD-ELGAWAD Amro, NIU Wen-tao

(Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China)

Abstract: Warm water coral (hereafter, coral) reef ecosystem is one of the most representative ecosystems in tropical waters. This article reviews the long-term changes of warm water coral reef ecosystem and its hazard factors under the background of global change, including the impacts and risks of climate change and human activities, and

summarizes the research progress of global change adaptability and restoration technology of coral reef ecosystem. The results show that: 1. over the past decades, coral reef ecosystem has experienced rapid degradation, including mass coral bleaching and death, significant decline of diversity and ecological function, which is mainly due to the impacts of ocean warming and human activities. 2. It is estimated that, at high greenhouse gas emission scenario such as RCP8.5, the South China Sea (SCS) is very likely to be 2 °C of warming above the pre-industrial levels by the mid-century at current linear warming rate of China seas, indicating that the climate tipping point of coral reef ecosystem in the SCS is very close, i.e., more than 90%–99% of the corals are projected to disappear at 2 °C of global warming. 3. Since the 1980s, the climate-induced hazard effects of intensity, extent and duration from ocean warming, heat waves and super strong tropical cyclones on corals have significantly increased, and led mass coral bleaching and the loss of corals worldwide. At the same time, human activities such as destructive fishing and over-fishing, logging and diving in coastal coral reef waters are not only local, but also global phenomenon, not only cause to damage on corals, but also increase the climate vulnerability of corals, making them more difficult to adapt to global warming. The analysis also shows that, in order to enhance the ability of coral to adapt to global changes, the study and practice on restoration and adaptation of damaged coral reef ecosystems have been carried out, mainly by means of asexual reproduction or combined with artificial matrix restoration, while sexual reproduction has been less used to restore damaged coral reefs. Recently, great progress has been made in the study on the adaptability of coral to heat resistance. Finally, this article discusses the restoration of damaged coral reef ecosystem and the related countermeasures in China.

Key words: marine environmental science; global change; coral reef ecosystem; risk; adaptation; restoration

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2021.01.002

(责任编辑:肖 静)