

大亚湾石珊瑚群落近 25 年的变化及其对 2008 年极端低温事件的响应

陈天然, 余克服*, 施祺, 李淑, Gilbert J. Price, 王嵘, 赵美霞, 陈特固, 赵建新

中国科学院边缘地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;

Radiogenic Isotope Laboratory, Centre for Microscopy & Microanalysis, The University of Queensland, Brisbane, QLD 4072, Australia

* 联系人, E-mail: kefuyu@scsio.ac.cn

2008-09-16 收稿, 2008-11-12 接受

中国科学院知识创新工程重要方向性项目(编号: KZCX2-YW-318)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB815905)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 40830852)和澳大利亚 ARC 课题(批准号: DP0773081)资助

摘要 在气候变暖、ENSO 加剧等导致全球珊瑚礁生态系统严重退化的背景下, 相对高纬度海域的石珊瑚群落被认为是石珊瑚物种延续的最后保留地, 但相对高纬度海域周期性的冬季低温是妨碍其发育的最重要因子之一。南海北部相对高纬度的大亚湾海区(22° 31' ~22° 50' N)近 40 年来持续变暖, 珊瑚群落发育但未成礁。2008 年初经历了近 50 年来罕见的极端低温事件, 持续 32 d, 大亚湾海区 2008 年 2 月平均 SST 低于 14°C, 连续多天最低 SST 为 12.3°C 左右, 低于传统认为的使珊瑚“致命”的温度(13°C), 日最低气温则低达 6.6°C。该海域的石珊瑚群落生态调查显示: (1) 近 25 年来大亚湾石珊瑚覆盖度从 76.6% 下降到 15.3%, 退化达 80%; (2) 石珊瑚群落优势种由霜鹿角珊瑚变成秘密角蜂巢珊瑚; (3) 2008 年低温事件对本区石珊瑚群落没有造成明显影响, 活珊瑚覆盖度没有发生明显变化。总体结果显示, 相对高纬度的大亚湾海区的珊瑚种类已经总体上适应了极端低温的环境, 具有进一步发育的潜力, 可望在全球变暖背景下成为石珊瑚物种的避难所。

关键词
相对高纬度
石珊瑚
极端低温
全球变暖
大亚湾

分布于热带海洋的珊瑚礁具有极丰富的生物多样性和极重要的生态服务功能, 是最重要的生态系统之一^[1]。但近几年来全球珊瑚礁生态系统处于急剧退化之中, 2004 年全球处于健康状态的珊瑚礁仅约 30%^[2]。如澳大利亚大堡礁活珊瑚的覆盖度(指单位面积内活珊瑚所覆盖的面积比例, 是衡量珊瑚礁健康状况的一个重要指标)由 1960 年的 40%~50% 下降到 2004 年的 20%^[3]; 加勒比海活珊瑚覆盖度由 1977 年的 50% 下降到 2001 年的 10%^[4]; 南海北部三亚鹿回头活珊瑚覆盖度由 1960 年的 85% 下降到 2006 年的 12.8%^[1]。全球气候变暖导致的珊瑚礁白化、海洋酸化, 以及人类活动加剧等是导致全球珊瑚礁严重退化的最主要原因^[2,5,6]。IPCC 预测到 21 世纪末珊瑚礁可能

成为因全球变暖而失去的第一个生态系统^[2]。在这一总体背景下, 相对高纬度的珊瑚礁因为夏季水温未超出珊瑚发育的上限(略高于 30 °C^[7]), 且长期生长在相对苛刻的环境下, 具有较强适应能力, 而被认为是珊瑚物种延续的最后避难所^[8~10]。但相对高纬度海区周期性的冬季低温又严重制约珊瑚的发育, 因为低温也能导致珊瑚礁白化死亡^[11~13]。

南海北部、相对高纬度的大亚湾(114°29'42"~114°49'42" E, 22°31'12"~22°50'00" N), 属于亚热带气候特征, 年平均海水表面温度(sea surface temperature, SST)约 23 °C, 最高月平均 SST 约 28 °C (7~8 月), 最低月平均 SST 约 15 °C (1~2 月), 干、湿季节分明^[14,15]。大亚湾为半封闭型、内湾式海湾, 面积约 600 km², 内

1) 赵美霞, 余克服, 张乔民, 等. 近 50 年来三亚鹿回头石珊瑚物种多样性的演变特征及其环境意义. 海洋环境科学 (已接受)

含大、小辣甲岛等岛屿, 沿着一些岛屿及海岸水深 5 m 以内的基岩上有石珊瑚群落分布(图 1), 1960 年以来即有报道^[16~20], 但迄今未发育成珊瑚礁。从珊瑚礁发育的最适温度范围(25~29 °C)^[21]来看, 冬季低温是制约本区珊瑚群落发育以及进一步成礁的最主要因素, 如 2008 年 1~2 月包括大亚湾在内的中国南方经历了近 50 年来罕见的低温灾害。本文通过近 3 年的连续生态监测, 结合近 25 年来的多次生态调查, 评估大亚湾珊瑚群落近 25 年来的动态变化, 及其对 2008 年初极端低温事件的响应, 对全球变暖背景下相对高纬度的珊瑚能否成为珊瑚物种延续的避难所进行科学评估。

1 大亚湾石珊瑚群落的分布与现状

2006 年 6 月、2007 年 8 月和 2008 年 2 月连续 3 年利用国际珊瑚礁生态研究中通用的样方法和截线样条法^[22]对大亚湾海域的石珊瑚群落的分布与生

态现状进行了调查。大亚湾石珊瑚群落呈斑块状零星分布在大亚湾中央岛屿(大辣甲、小辣甲、马鞭洲、白沙洲等)以及少数沿岸(如杨梅坑、大碓)水深小于 5 m 的基岩上(图 1)。珊瑚生长较稀疏, 群落空间结构简单, 垂直分层不明显, 生长带窄(一般小于 30 m)。相对于低纬度海域, 大亚湾石珊瑚种类较少, 仅 11 科 20 属 34 种(网络版附件-1)。珊瑚类型单调, 以皮壳状和块状石珊瑚占绝对优势。2006 年 6 月、2007 年 8 月和 2008 年 2 月调查显示大亚湾石珊瑚群落优势种为蜂巢珊瑚科(*Faviidae*)角蜂巢珊瑚属(*Favites*)的秘密角蜂巢珊瑚(*Favites abdita*), 比较常见的有十字牡丹珊瑚(*Pavona decussata*)、腐蚀刺柄珊瑚(*Hydnophora exesa*)、盾形陀螺珊瑚(*Turbinaria peltata*)、罗图马蜂巢珊瑚(*Favia rotumana*)、多弯角蜂巢珊瑚(*Favites flexuosa*)、五角蜂巢珊瑚(*Favites pentagona*)、粗糙菊花珊瑚(*Goniastrea aspera*)、精巧扁脑

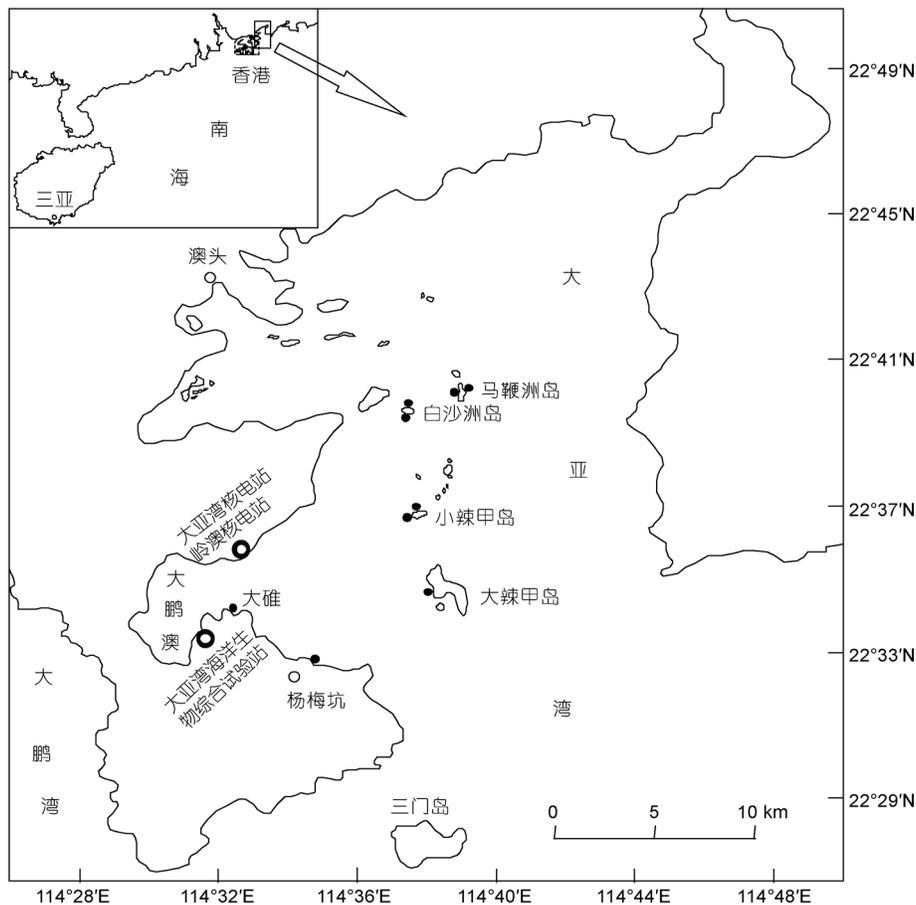


图 1 大亚湾地理位置及珊瑚群落分布

●表示 2007 和 2008 年调查的珊瑚群落

珊瑚(*Platygyra daedalea*)、中华扁脑珊瑚(*Platygyra sinensis*)、多孔同星珊瑚(*Plesiastrea versipora*)、紫小星珊瑚(*Leptastrea purpurea*)、锯齿刺星珊瑚(*Cyphastrea serailia*)、澄黄滨珊瑚(*Porites lutea*)和柱角孔珊瑚(*Goniopora columna*)等14种,其中9种属于蜂巢珊瑚科的7个属,显示蜂巢科珊瑚对大亚湾相对低温的生存环境有良好的适应性.其余20个珊瑚种不常见.

2 近25年来大亚湾石珊瑚群落的动态变化及其原因

图2显示近25年来大亚湾不同地点石珊瑚群落覆盖度的动态变化,总体上呈明显退化趋势:大辣甲1983/1984,1991,2003,2006,2007和2008年的覆盖度分别为72.7%^[17],32%^[18],22.9%^[19],20.5%^[20],20.9%和20.3%(图2(a));小辣甲1983/1984,1991,2007和2008年的覆盖度分别为78.1%^[17],32%^[18],15.7%和15.2%(图2(b));白沙洲1983/1984,2007和2008年的覆盖度分别为77.7%^[17],6.2%和5.8%(图2(c));马鞭洲1983/1984,2003,2007和2008年的覆盖度分别为88.7%^[17],11.9%^[19],0和0(图2(d));杨梅坑2006,2007和2008年的覆盖度分别为19.5%^[20],20.1%和19.6%.林昭进等人^[19]虽然报道了小辣甲岛北边珊瑚覆盖度达58.8%,但因为其调查范围小、布设断面太少,不能反映该岛屿珊瑚的总体状况.若以各珊瑚群落分布地点活珊瑚覆盖度的平均值代表大亚湾珊瑚的覆盖度,则1983/1984,1991,2003,2006,2007和2008年大亚湾海区的石珊瑚覆盖度分别为76.6%,32%,27.5%,20%,15.7%和15.3%.马鞭洲的珊瑚在2003年以后已经全部消失,则不再计算到总覆盖度中.近25年大亚湾珊瑚群落退化的总体趋势与加勒比海^[4]、澳大利亚大堡礁^[3]的一致(图2(e)),但退化幅度明显高于珊瑚礁保护较好的大堡礁,也高于过度开发的加勒比海.造成大堡礁珊瑚礁退化主要原因是气候变暖导致大面积珊瑚礁白化,以及飓风、长棘海星爆发和病害事件^[2,3];除上述自然因素外,加勒比海珊瑚礁还遭受到剧烈的人类活动影响,如过度捕捞、污染导致的富营养化和沉积物量增加等^[2,4,23].

在活珊瑚覆盖度显著下降的同时,大亚湾石珊瑚群落的退化还表现在:(1)霜鹿角珊瑚(*Acropora pruinosa*)种群消失殆尽.在1983/1984年调查中^[17],霜鹿角珊瑚作为优势种在高达76.6%的活珊瑚覆盖度中占1/3,远高于其他珊瑚种,而在1991年8月及

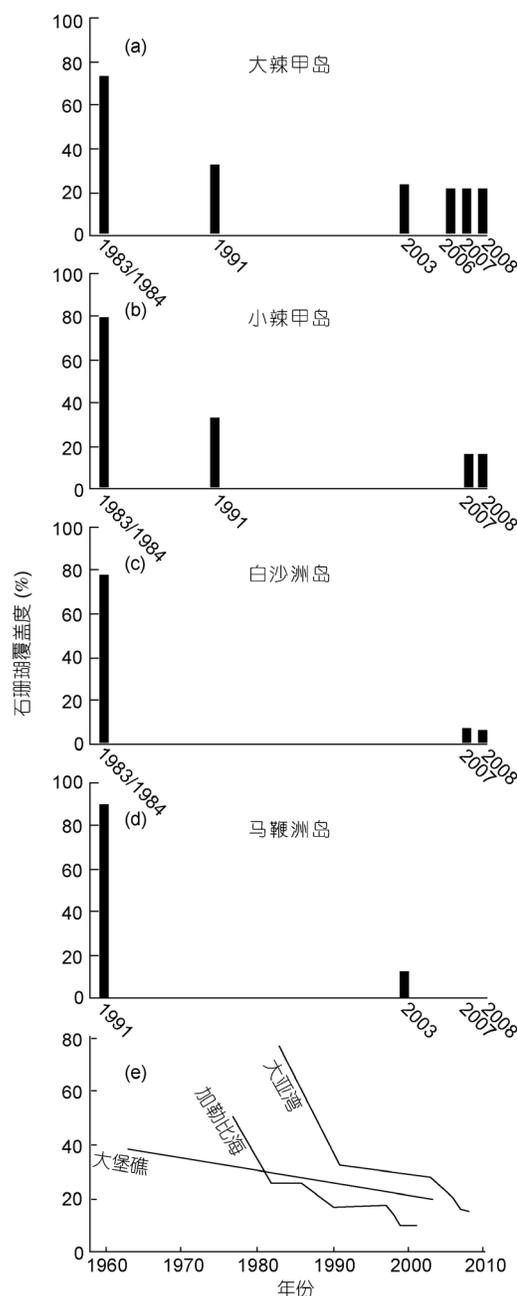


图2 大亚湾活珊瑚覆盖度的变化过程及其与加勒比海和大堡礁的比较

加勒比海和大堡礁活珊瑚覆盖度变化曲线分别来源于文献^[4]和^[3]

以后的调查中^[18,20],霜鹿角珊瑚已成为稀有种,小皮壳状或块状秘密角蜂巢珊瑚成为优势种;(2)部分海域石珊瑚群落整体消失,覆盖度降到0,如马鞭洲等.1983~1984年,活珊瑚覆盖度达88.7%的马鞭洲是大辣甲、小辣甲、白沙洲和马鞭洲4个岛中最高的^[17].但由于建设油库码头,将岛四周围用泥土、石块和水泥

块层层加固, 2003 年覆盖度为 11.9%^[19], 2007 年 8 月和 2008 年 2 月的调查中发现石珊瑚群落已经完全消失, 反映了人类活动对本区珊瑚群落的直接干扰. 除了直接破坏以外, 人类活动引起的大亚湾水体富营养化及其导致的赤潮、水体混浊、陆源沉积物增加、海岸侵蚀加剧等, 也是导致珊瑚共生虫黄藻密度降低^[24]和珊瑚疾病、死亡、群落退化的原因, 像世界其他珊瑚礁区一样^[25-28]. 毗邻大亚湾的香港珊瑚群落在 20 世纪 80 年代曾经出现过类似的情况, 即由于水体污染、沉积物量增加以及渔业活动频繁等, 导致香港珊瑚群落覆盖度和生物多样性显著下降, 珊瑚生态退化严重^[29-31]. 急剧退化的珊瑚群落在短期内表现出不同程度的恢复, 但在人为的持续干扰下则呈持续退化趋势^[32,33].

主要珊瑚种群的年龄结构也反映群落动态变化和发展趋势^[34-36], 我们因此用人口普查的方法对大亚湾块状秘密角蜂巢珊瑚和澄黄滨珊瑚的年龄结构进行了调查. 具体测量了它们的大小, 室内用 X-射

线分析方法揭示该海区秘密角蜂巢珊瑚和澄黄滨珊瑚的生长率分别为 4.7 和 10.7 mm/a, 再结合实测的个体大小估算其年龄结构. 结果表明(图 3), 整个调查区域仅 3 块珊瑚超过 50 a (对应于 1958 年前), 大多数介于 15~30 a (对应于 1977~1993 年)之间, 近 15 年(即 1993 年)来发育的珊瑚个数呈明显减少趋势, 这与珊瑚覆盖度所揭示的大亚湾珊瑚群落总体退化趋势一致, 但与近 20 年来该海区冬季 SST 持续变暖而理论上有助于珊瑚发育的推论^[15]不一致. 实测的 SST 资料表明, 近 40 年来在全球变暖的背景下, 大亚湾冬季最冷月平均 SST 和年平均 SST 存在明显的上升趋势(图 4), 特别是从 20 世纪 70 年代后期以来, SST 出现过 1987 和 1998 年两次显著性变暖^[37]. 1987 年后是大亚湾海区加速变暖的时期. 并且, 冬季变暖趋势明显, 而夏季最热月平均 SST 变暖趋势(图 4)却相对缓和, 从理论上讲, 大亚湾 SST 的变暖过程对于该地区受冬季低温影响的石珊瑚生长是有利的, 大部分块状珊瑚生长于 1977~1993 年间可能与此相对应. 近

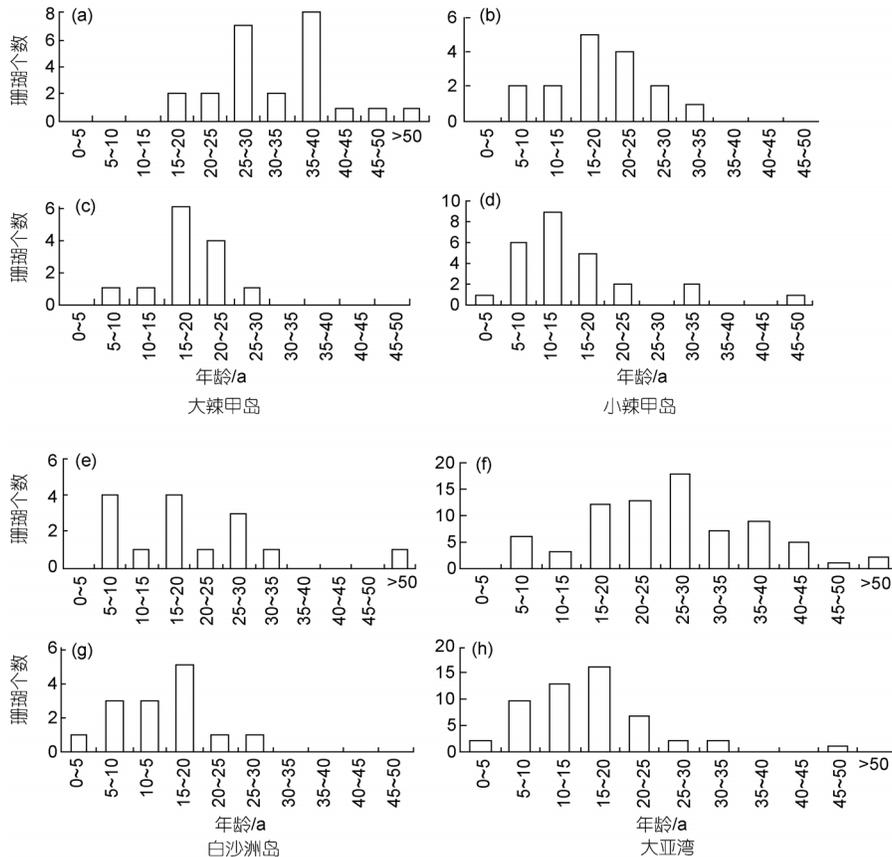


图 3 石珊瑚年龄分布

(a), (b), (c), (f) 为秘密角蜂巢珊瑚; (c) (d), (g), (h) 为澄黄滨珊瑚

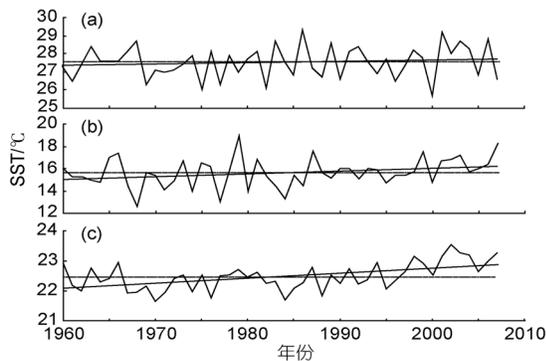


图4 大亚湾1960~2007年月平均最高SST(a)、最低SST(b)和年平均SST(c)

20多年来南海北部雷州半岛现代珊瑚礁的发育^[38]、浙江省南麂列岛(27°24'30"~27°30'00"N, 120°24'30"~121°08'30"E)造礁石珊瑚的出现^[39]等也是全球变暖的结果。世界范围内,全球变暖促进了造礁石珊瑚向高纬度延伸,扩大了造礁石珊瑚的地理分布范围^[40]。大亚湾珊瑚没有随着SST变暖而加速发育则可能体现了人类活动对珊瑚群落的影响。

3 大亚湾石珊瑚群落对2008年极端低温事件的响应

受La Niña事件和大气环流异常的影响,2008年初包括大亚湾在内的中国南方发生了50年一遇的极

端低温事件^[41]。该低温事件从2008年1月13日开始至2月13日结束,共持续32d,持续时间之长十分罕见^[42]。惠东气象记录表明,从1月24日开始,大亚湾出现持续阴雨低温天气(图5(a)),日平均气温低于10℃有6d,在1月31日和2月2日分别出现了6.6和6.8的极值。SST变化与气温相似但在降温幅度上略滞后于气温,毗邻大亚湾的遮浪海洋观测站记录的SST(图5(b))表明,2008年2月平均SST(14.1℃)比1月(17.3℃)降低了3.2℃,从2月6日开始至2月24日连续19d日平均SST低于14℃,日最低SST达到了12.8℃(2月9日)和12.9℃(2月14日)。我们于2月24~29日对大亚湾的珊瑚群落进行了调查。这一期间我们在杨梅坑、大辣甲、小辣甲和白沙洲等珊瑚分布区实测的SST为(13±0.2)℃,只有在离大亚湾核电站最近、受温排水直接影响的大礁测得(14±0.3)℃的SST。与同期遮浪海洋观测站记录的SST(13.4~14.3℃)相比,大亚湾主要珊瑚分布区的SST约低0.5~0.8℃,可能是由于大亚湾珊瑚分布区相对偏远及位置、地形差异所致。据此估计2月9~14日最低SST期间大亚湾珊瑚分布区的SST为12.3℃左右,低于了传统认为的使大多数相对高纬度珊瑚礁“致命”的温度(约13℃)^[7,43]。

因为造礁珊瑚一般生活在热带或亚热带相对比较温暖的水域里,其真正经历到低温并持续使其死

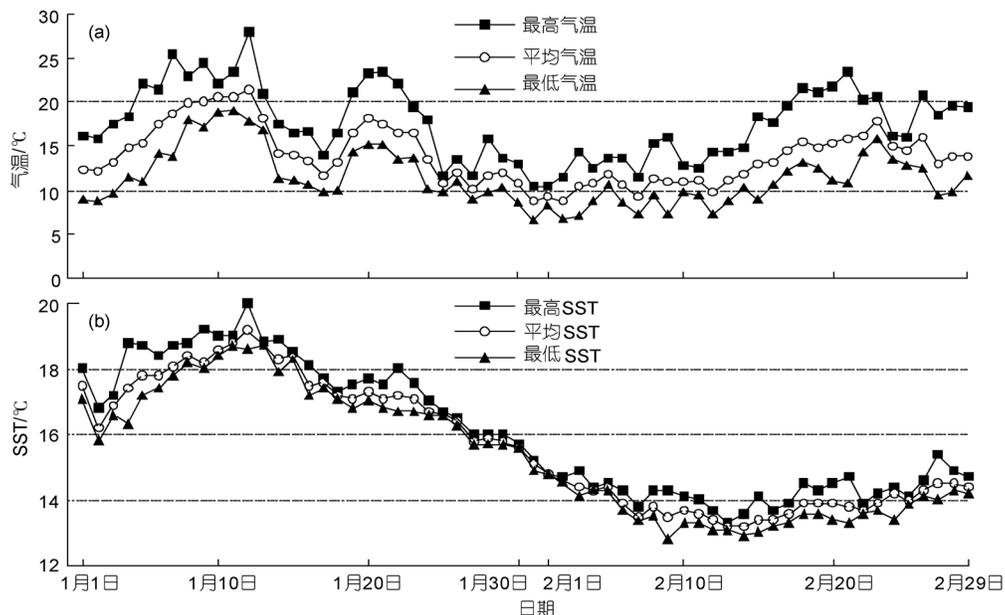


图5 大亚湾海区2008年1月1日~2月29日逐日平均、最高、最低气温和SST

亡的机会并不多,且不同海域可能还有差别,因此迄今为止关于珊瑚“致命”的温度及其在该温度(或以下)的持续时间并没有定论。从国际上其他海域的情况来看,Veron等人^[43]统计日本石珊瑚物种多样性随纬

度变化的关系,得出日本海域22.5%的珊瑚能够忍受10.4℃的瞬时低温(或为致命温度),27%的珊瑚能忍受13.2℃的瞬时低温,14.8%的珊瑚能够忍受14.1℃的瞬时低温;美国佛罗里达州南部Dry Tortugas礁区

(24°37'N)在1977年1月中旬的冷事件中, SST 下降到 16 以下持续 8 d, 14 以下持续 60 h, 极值为 12.6 , 导致石珊瑚死亡率达 90%以上^[44,45]; 同样也是冷事件, 发生在 1988 年 12 月至 1989 年 3 月阿拉伯湾 (Arabian Gulf)西部 Manifa 礁区(27°40'N), SST 持续 4 d 达 11.5 , 超过 30 d 低于 13 , 导致优势种鹿角珊瑚 (*Acropora pharaonis*)和精巧扁脑珊瑚(*Platygyra daedalea*)死亡严重^[46]; 2003 年 7 月澳大利亚大堡礁南部的 Heron Island (23°32'S)气温降至 12 , 持续约 1 周, 导致了该水域珊瑚礁严重的冷白化^[13], 但没有与气温同步的 SST 记录. 关于南海的珊瑚生长与低温的关系, Yu 等人^[11]曾经报道了南海北部雷州半岛珊瑚 Sr/Ca 记录的中全新世 10.7 的低温以及伴随着低温事件发生的多次珊瑚礁冷白化, 但没有回答珊瑚在该温度下的持续时间; 聂宝符等人^[7]结合南海各礁区长期观测的水温资料和造礁珊瑚的生长情况, 得出水温低于 13 时, 大部分珊瑚将受到致命的创伤, 但该结论并没有依据实际的珊瑚生长观测与低温对比, 同样也没有给出在水温 13 以下珊瑚能够持续生存多久. 因此, 2008 年 1~2 月发生在中国南方的极端低温事件, 为我们了解南海珊瑚对低温的适应能力提供了宝贵的机会.

对大亚湾海区的实际生态调查表明, 2008 年 1~2 月的低温事件中所有的珊瑚复体, 不论其大小或类型(枝状、块状、皮壳状、叶片状等), 均没有出现死亡(图 6). 仔细观察发现, 在白天伸出珊瑚虫触手的一些种属, 如盾形陀螺珊瑚、多孔同星珊瑚、霜鹿角珊瑚等, 部分复体仅半伸出或者不伸出触手, 可能是石珊瑚对低温胁迫的自我保护. 在杨梅坑、大辣甲、小辣甲和白沙洲测得的活珊瑚覆盖度分别为 19.6%, 20.3%, 15.2%和 5.8%, 与 2007 年 8 月相比大亚湾珊瑚群落没有出现明显的变化. 大亚湾 1960 至 2008 年间冬季最冷月(2月)平均 SST 为(15.6±1.3) , 据统计, 近 100 年来(1908~2008 年)华南沿海 2 月份发生过 7 次极端冷事件, 分别在 1925, 1945, 1947, 1957, 1964, 1968 和 2008 年, 其中 1945 年 2 月的寒冷程度很可能超过 2008 年^[47]. 近 48 年的观测资料表明, 大亚湾历史上曾出现过 12.6 (1968 年 2 月)和 13.0 (1977 年 2 月)的极端月平均 SST. 但根据早期调查记录^[17,18]和年龄结构(图 3)推算, 不少珊瑚生长已经存在超过 30 a 甚至 50 a, 如我们已经采集到并开展了 X-射线骨骼生长率分析和骨骼 Sr/Ca 分析的滨珊瑚样品持续生长 46 a (1962~2007 年). 1983/1984 年调查表明当时活珊瑚覆盖率达 76.6%且存在大面积霜鹿角珊瑚^[17],

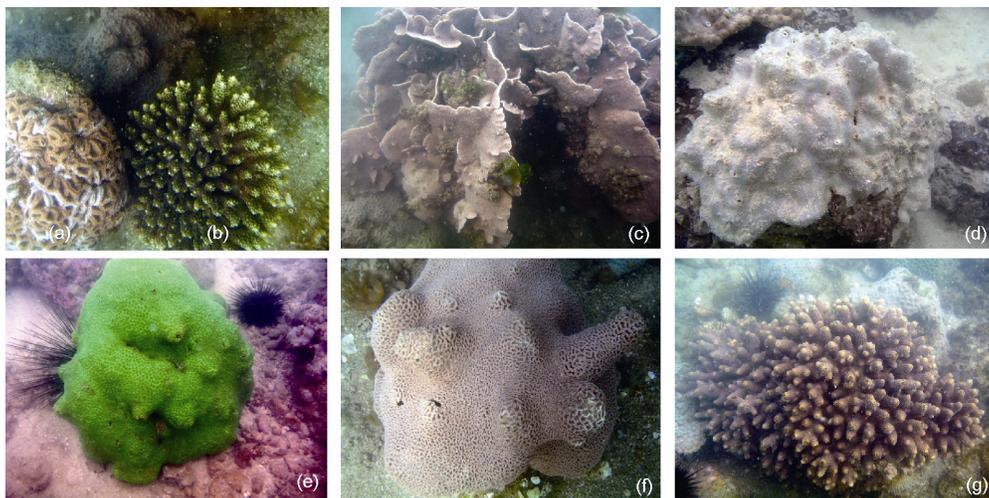


图 6 健康的石珊瑚群落

(a) 秘密角蜂巢珊瑚, (b) 霜鹿角珊瑚, (c) 十字牡丹珊瑚, (d) 澄黄滨珊瑚, (e) 多孔同星珊瑚, (f) 精巧扁脑珊瑚, (g) 指形鹿角珊瑚. 比例尺 1:8

这些现象表明, 近 50 年来的冬季极端低温对该地区石珊瑚群落没有造成明显影响. 此次冷事件期间, 大亚湾 SST 极低值达 12.3 左右, 持续 6 d 低于 13 , 超过 19 d 低于 14 , 月平均 SST 仅 14.1 , 但该区珊瑚没有出现冻死现象, 显示大亚湾的珊瑚基本上适应了类似的低温环境.

国际上对相对高纬度海域的珊瑚有不少报道, 甚至不少区域比大亚湾的纬度高得多, 如澳大利亚

西岸的 Abrolhos 岛(~29°S)^[48]、美国佛罗里达州的 Triumph 等珊瑚礁(~25°N)^[49]、百慕大的珊瑚礁(32°20'N)^[50]、南非 Sodwana 湾的 Nine-mile 珊瑚礁(27°24'53.7"S)^[51,52]等, 但这些海域受暖流等因素的影响, 冬季 SST 达 18 以上, 很少受极端低温事件的袭击, 因此能够形成珊瑚礁, 其珊瑚物种多样性明显高于只有珊瑚群落但没有形成珊瑚礁的大亚湾. 但从大亚湾的珊瑚类型与属种分布情况来看, 这里占

绝对优势的块状、皮壳状珊瑚正是对低温有强抵抗力的类型,绝对优势属种如 *Favia*、*Porites* 等也正是其他海域最能够适应低温的珊瑚属种^[43,53],如日本海域纬度高约 34°N 的 Tateyama,这里受黑潮暖流影响,最高月平均 SST 为 25.9,最冷月平均 SST 为 16.1,这里记录的最冷月平均 SST 为 14.1 (与 2008 年 2 月冷事件中大亚湾的 SST 相同),瞬时最低 SST 为 10.6^[43],这里所记录的 23 种珊瑚基本上为块状、皮壳状^[54],与大亚湾的珊瑚类型非常相似。

正如 Veron 等人^[43]所指出,同一珊瑚种在不同的海域有不同的温度忍耐极限,不同海域有自己特征的适应极端温度的珊瑚种,如日本海域有 8 个适应相对高纬度的特有珊瑚种,而南海这方面的信息仍然缺乏,再次突显加强对南海相对高纬度珊瑚生长及其与低温关系研究的重要性。大亚湾海域除了广泛发现的、对低温具有强忍耐力的块状和皮壳状珊瑚以外,还有不少枝状、片状的珊瑚,如鹿角珊瑚(*Acropora*)和蔷薇珊瑚(*Montipora*)等(见网络版附件-1),它们在 2008 年 1~2 月的极端低温事件中同样显示出了强的忍耐能力(图 6),事实上,不少传统认为对低温非常敏感的枝状珊瑚、片状珊瑚也开始作为珊瑚群落的一部分出现在更高纬度的海域,如枝状鹿角珊瑚(*Acropora tumida*)在日本纬度约 34°N 的 Tateyama^[54]和 32°N 的 Amakusa^[55]海域的出现、片状蔷薇珊瑚

(*Montipora*)在 32°N 的 Amakusa 海域的出现^[56]等,显示在全球变暖导致珊瑚礁热白化加剧的背景下,越来越多的珊瑚物种可能逐渐向相对高纬度的海域扩展,因此相对高纬度海区很可能成为石珊瑚的避难所。

4 结论

(1) 南海北部相对高纬度的大亚湾海区在全球变暖的总体背景下,冬季 SST 持续上升,理论上有利于石珊瑚发育;但近 25 年来的生态监测则显示大亚湾海区活珊瑚覆盖度呈持续下降的趋势,从 1983/1984 年的 76.6% 下降到 15.3%,退化达 80%。

(2) 2008 年初包括大亚湾海区在内的中国南方发生了近 50 年一遇的极端低温事件,持续 32 d,大亚湾海区 1, 2 月平均气温分别降到 15 和 12.7,日最低气温低达 6.6;大亚湾海区 2 月平均 SST(14.1)比 1 月(17.3)下降了 3.2,连续 19 d 日平均 SST 低于 14,连续 6 d 最低 SST 为 12.3 左右,远低于了传统认为的使大多数相对高纬度珊瑚礁“致命”的温度(约 13),但该海区珊瑚群落没有受到明显的影响,显示大亚湾海区的珊瑚已经基本上适应了低温环境,也反映相对高纬度的海区有可能成为全球变暖背景下珊瑚生长北移的场所。

致谢 感谢审稿者和特邀编辑对本文提出了建设性的修改建议,感谢中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站在野外调查工作中给予的支持。

参考文献

- Moberg F, Folke C. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecol Econ*, 1999, 29: 215—233
- Wilkinson C. Status of Coral Reef of the World. Townsville: Australian Institute of Marine Science Press, 2004. 1—316
- Bellwood D R, Hughes T P, Folke C, et al. Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 2004, 429: 827—833
- Gardner T A, Cote I M, Gill J A, et al. Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*, 2003, 301: 958—960
- Hoegh-Guldberg O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar Freshwater Res*, 1999, 50: 839—866
- 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
- 聂宝符, 陈特固, 梁美桃, 等. 南沙群岛及其邻近礁区造礁珊瑚与环境变化的关系. 北京: 科学出版社, 1997. 1—101
- Riegl B. Climate change and coral reefs: Different effects in two high-latitude areas (Arabian Gulf, South Africa). *Coral Reefs*, 2003, 22: 433—446
- Halfar J, Godinez-Orta L, Riegl B, et al. Living on the edge: High-latitude *Porites* carbonate production under temperate eutrophic conditions. *Coral Reefs*, 2005, 24: 582—592
- Glynn P W. Coral reef bleaching: Facts, hypotheses and implications. *Glob Change Biol*, 1996, 2: 495—509
- Yu K F, Zhao J X, Liu T S, et al. High-frequency winter cooling and reef coral mortality during the Holocene climatic optimum. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 224: 143—155
- 余克服, 刘东生, 沈承德, 等. 雷州半岛全新世高温期珊瑚生长所揭示的环境突变事件. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32(2): 149—157
- Hoegh-Guldberg O, Fine M. Low temperature cause coral bleaching. *Coral Reefs*, 2004, 23: 444
- 徐恭昭. 大亚湾环境与资源. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1989. 1—373
- 余克服, 王肇鼎, 练建生. 近 50 年来大亚湾及周边地区气候变化趋势. 见: 潘金培, 王肇鼎, 吴信忠, 主编. 中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站研究年报, 第 3 期. 北京: 科学出版社, 2001. 1—9
- 苏炳之. 广东汕头海产无脊椎动物初步调查. 见: 寿振黄, 贾相刚, 编. 动物生态及分类区系专业学术讨论会论文摘要汇编.

- 北京: 科学出版社, 1962. 15
- 17 张元林, 邹仁林. 大亚湾浅水石珊瑚群落的研究. *热带海洋*, 1987, 6(1): 12—18
 - 18 温伟英, 邹仁林, 杜完成, 等. 大亚湾核电站温排水对石珊瑚群落的影响 I 核电站运转前的石珊瑚群落. 见: 潘金培, 蔡国雄, 主编. 中国科学院南海海洋研究所大亚湾海洋生物综合实验站研究年报, 第 1 期. 北京: 科学出版社, 1996. 18—22
 - 19 林昭进, 邱永松, 张汉华, 等. 大亚湾浅水石珊瑚的分布现状及生态特点. *热带海洋学报*, 2007, 26(3): 63—67
 - 20 陈天然, 余克服, 施祺, 等. 广东大亚湾石珊瑚群落的分布及动态变化. *热带地理*, 2007, 27(6): 493—498
 - 21 余克服. 雷州半岛灯楼角珊瑚礁的生态特征与资源可持续利用. *生态学报*, 2005, 25(4): 669—675
 - 22 Hill J, Wilkinson C. *Methods for Ecological Monitoring of Coral Reefs*. Townsville: Australian Institute of Marine Science Press, 2004. 1—117
 - 23 Hughes T P. Catastrophes, phase-shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science*, 1994, 265: 1547—1551
 - 24 李淑, 余克服, 施祺, 等. 南海北部珊瑚共生虫黄藻密度的种间与空间差异及其对珊瑚礁白化的影响. *科学通报*, 2007, 52(22): 2655—2662
 - 25 Edinger E N, Limmon G V, Jompa J, et al. Normal coral growth rates on dying reefs: are coral growth rates good indicators of reef health? *Mar Pollut Bull*, 2000, 40(5): 404—425
 - 26 Brunol J F, Petes L E, Harvell C D, et al. Nutrient enrichment can increase the severity of coral diseases. *Ecol Lett*, 2003, 6: 1056—1061
 - 27 Nugues M M, Roberts C M. Partial mortality in massive reef corals as an indicator of sediment stress on coral reefs. *Mar Pollut Bull*, 2003, 46: 314—323
 - 28 Nugues M M, Roberts C M. Coral mortality and interaction with algae in relation to sedimentation. *Coral Reefs*, 2003, 22: 507—516
 - 29 Cope M, Morton B. The scleractinian coral community at Hoi Ha Wan, Hong Kong. *Asian Mar Biol*, 1988, 5: 41—52
 - 30 Scott P J B. Chronic pollution recorded in coral skeletons in Hong Kong. *J Exp Mar Biol Ecol*, 1990, 139: 51—64
 - 31 Morton B. Hong Kong's coral communities: Status, threats and management plans. *Mar Pollut Bull*, 1994, 29(1-3): 74—83
 - 32 Connell J H, Hughes T P, Wallace C C. A 30-year study of coral abundance, recruitment, and disturbance at several scales in space and time. *Ecol Monogr*, 1997, 67(4): 461—488
 - 33 Hughes T P, Connell J H. Multiple stressors on coral reefs: A long-term perspective. *Limnol Oceanogr*, 1999, 44(3): 932—940
 - 34 Soong K. Colony size as a species character in massive reef corals. *Coral Reefs*, 1993, 12: 77—83
 - 35 Bak R P M, Mcesters E H. Coral population structure: The hidden information of colony size-frequency distributions. *Mar Ecol Prog Ser*, 1998, 162: 301—306
 - 36 Adjeroud M, Pratchett M S, Kospartov M C, et al. Small-scale variability in the size structure of scleractinian corals around Moorea, French Polynesia: Patterns across depths and locations. *Hydrobiologia*, 2007, 589: 117—126
 - 37 陈新光, 钱光明, 陈特固, 等. 广东气候变暖若干特征及其对气候带变化的影响. *热带气象学报*, 2006, 22(6): 547—552
 - 38 余克服. 雷琼海区近 40 年海温变化趋势. *热带地理*, 2000, 20: 111—115
 - 39 塘质灿, 孙建章. 造礁石珊瑚. *大自然*, 2008, 1: 18—20
 - 40 Precht W F, Aronson R B. Climate flickers and range shifts of reef corals. *Front Ecol Environ*, 2004, 2(6): 307—314
 - 41 吴乃庚, 林良勋, 李天然, 等. 2008 年初广东罕见低温雨雪冰冻天气的成因初探. *广东气象*, 2008, 30(1): 4—7
 - 42 黄珍珠, 杜尧东, 潘蔚娟, 等. 2008 年广东罕见寒冷灾害的特点、影响及防寒减灾对策. *广东气象*, 2008, 30(1): 8—11
 - 43 Veron J E N, Minchin P R. Correlations between sea surface temperature, circulation patterns and the distribution of hermatypic corals of Japan. *Cont Shelf Res*, 1992, 12(7-8): 835—857
 - 44 Porter J W, Battey J F, Smith G J. Perturbation and change in coral reef communities. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1982, 79: 1678—1681
 - 45 Roberts H H, Rouse L J. Cold-water stress in Florida bay and northern Bahamas: A product of winter cold-air outbreaks. *J Sediment Petrol*, 1982, 52(1): 145—155
 - 46 Coles S L, Fadlallah Y H. Reef coral survival and mortality at low temperatures in the Arabian Gulf: New species-specific lower temperature limits. *Coral Reefs*, 1991, 9: 231—237
 - 47 陈特固, 时小军, 余克服. 华南沿海近 100 年来 2 月份的极端气温事件. *热带地理*, 2008, 28(3): 199—202
 - 48 Johannes R E, Wiebe W J, Crossland C J, et al. Latitudinal limits of coral reef growth. *Mar Ecol Prog Ser*, 1983, 11: 105—111
 - 49 Burns T P. Hard-coral distribution and cold-water disturbances in South Florida: Variation with depth and location. *Coral Reefs*, 1985, 4: 117—124
 - 50 Cook C B, Logan A, Ward J, et al. Elevated temperatures and bleaching on a high latitude coral reef: The 1988 Bermuda event. *Coral Reefs*, 1990, 9: 45—49
 - 51 Celliers L, Schleyer M H. Coral bleaching on high-latitude marginal reefs at Sodwana Bay, South Africa. *Mar Pollut Bull*, 2002, 44: 1380—1387
 - 52 Schleyer M H, Kruger A, Celliers L. Long-term community changes on a high-latitude coral reef in the Greater St Lucia Wetland Park, South Africa. *Mar Pollut Bull*, 2008, 56: 493—502
 - 53 Nozawa Y, Tokeshi M, Nojima S. Structure and dynamics of a high-latitude scleractinian coral community in Amakusa, southwestern Japan. *Mar Ecol Prog Ser*, 2008, 358: 151—160
 - 54 Veron J E N. *Hermatypic Corals of Japan*. Monogr Ser Vol 9. Townsville: Australia Institute of Marine Science Press, 1992. 1—234
 - 55 Nozawa Y, Tokeshi M, Nojima S. Reproduction and recruitment of scleractinian corals in a high-latitude coral community, Amakusa, southwestern Japan. *Mar Biol*, 2006, 149: 1047—1058
 - 56 Woesik R V. Coral communities at high latitude are not pseudopopulations: Evidence of spawning at 32°N, Japan. *Coral Reefs*, 1995, 14: 119—120

附件-1 大亚湾石珊瑚群落历次生态调查种属名录^{a)}

序号	石珊瑚种名	大亚湾石珊瑚群落历次调查					
		1964	1983/1984	1991	2003	2006	2007
1	膨胀蔷薇珊瑚 <i>Montipora turgescens</i> (Bernard, 1897)					+	+
2	脉状蔷薇珊瑚 <i>Montipora venosa</i> (Ehrenberg, 1834)						+
3	中华蔷薇珊瑚 <i>Montipora sinensis</i> (Bernard, 1897)		+	+			
4	何氏蔷薇珊瑚 <i>Montipora hoffmeisteri</i> (Wells, 1954)					+	
5	霜鹿角珊瑚 <i>Acropora pruinosa</i> (Brook, 1893)		+	+	+	+	+
6	指形鹿角珊瑚 <i>Acropora digitifera</i> (Dana, 1846)					+	+
7	单独鹿角珊瑚 <i>Acropora solitaryensis</i> (Veron and Wallace, 1984)					+	
8	浪花鹿角珊瑚 <i>Acropora cytherea</i> (Dana, 1846)	+					
9	粗野鹿角珊瑚 <i>Acropora humilis</i> (Dana, 1846)	+					
10	<i>Acropora</i> sp.				+		
11	罩柱群珊瑚 <i>Stylocoeniella guentheri</i> (Bassett-Smith, 1890)		+	+			+
12	丛生盔形珊瑚 <i>Galaxea fascicularis</i> (Linnaeus, 1767)				+		+
13	浅薄沙珊瑚 <i>Psammocora superficialis</i> (Gardiner, 1898)					+	+
14	毗邻沙珊瑚 <i>Psammocora contigua</i> (Esper, 1794)		+				
15	深室沙珊瑚 <i>Psammocora profundacella</i> (Gardiner, 1898)	+				+	
16	十字牡丹珊瑚 <i>Pavona decussata</i> (Dana, 1846)		+	+	+	+	+
17	细微小褶叶珊瑚 <i>Micronussa minuta</i> (Moll and Borel-Best, 1984)					+	
18	粗糙刺叶珊瑚 <i>Echinophyllia aspera</i> (Ellis and Solander, 1788)		+		+	+	+
19	腐蚀刺柄珊瑚 <i>Hydnophora exesa</i> (Pallas, 1766)	+	+	+		+	+
20	盾形陀螺珊瑚 <i>Turbinaria peltata</i> (Esper, 1794)	+	+	+	+	+	+
21	波形陀螺珊瑚 <i>Turbinaria undata</i> (Bernard, 1896)	+					
22	菌状陀螺珊瑚 <i>Turbinaria agarecia</i> (Bernard, 1896)	+					
23	褶皱陀螺珊瑚 <i>Turbinaria mesenterina</i> (Lamarck, 1816)		+				
24	扭曲陀螺珊瑚 <i>Turbinaria contorta</i> (Bernard, 1896)	+					
25	漏斗陀螺珊瑚 <i>Turbinaria crater</i> (Pallas, 1766)	+					
26	大刺星珊瑚 <i>Acanthathrea echinata</i> (Dana, 1846)						+
27	神龙岛蜂巢珊瑚 <i>Favia lizardensis</i> (Veron and Pichon, 1977)						+
28	罗图马蜂巢珊瑚 <i>Favia rotumana</i> (Gardiner, 1899)		+			+	+
29	标准蜂巢珊瑚 <i>Favia speciosa</i> (Dana, 1846)	+	+	+	+	+	+
30	美龙氏蜂巢珊瑚 <i>Favia veroni</i> (Moll and Borel-Best, 1984)						+
31	秘密角蜂巢珊瑚 <i>Favites abdita</i> (Ellis and Solander, 1786)	+	+	+	+	+	+
32	多弯角蜂巢珊瑚 <i>Favites flexuosa</i> (Dana, 1846)					+	+
33	五角角蜂巢珊瑚 <i>Favites pentagona</i> (Esper, 1794)	+			+	+	+
34	粗糙菊花珊瑚 <i>Goniastrea aspera</i> (Verrill, 1905)		+			+	+
35	山成菊花珊瑚 <i>Goniastrea yamanarii</i> (Yabe and Sugiyama, 1836)	+					
36	肉质扁脑珊瑚 <i>Platygyra carnosus</i> (Veron, 2000)					+	+
37	尖边扁脑珊瑚 <i>Platygyra acuta</i> (Veron, 2000)						+
38	中华扁脑珊瑚 <i>Platygyra sinensis</i> (Milne Edwards & Haime, 1849)						+
39	精巧扁脑珊瑚 <i>Platygyra daedalea</i> (Ellis and Solander, 1786)				+	+	+
40	朴素扁脑珊瑚 <i>Platygyra rustica</i> (Dana, 1846)		+	+			
41	多孔同星珊瑚 <i>Plesiastrea versipora</i> (Lamarck, 1816)		+			+	+
42	卷曲黑星珊瑚 <i>Oulastrea crispate</i> (Lamarck, 1816)						+
43	白斑小星珊瑚 <i>Leptastrea pruinosa</i> (Crossland, 1952)						+
44	紫小星珊瑚 <i>Leptastrea purpurea</i> (Dana, 1846)	+	+		+		+
45	锯齿刺星珊瑚 <i>Cyphastrea serailia</i> (Forsk., 1775)	+	+	+	+	+	+
46	亚氏滨珊瑚 <i>Porites aranetai</i> (Nemenzo, 1955)						+
44	澄黄滨珊瑚 <i>Porites lutea</i> (Milne Edwards and Harime, 1851)	+	+	+	+	+	+
45	扁缩滨珊瑚 <i>Porites compressa</i> (Dana, 1846)	+			+		
46	柱角孔珊瑚 <i>Goniopora columna</i> (Dana, 1846)		+	+		+	+
47	<i>Goniopora norfolkensis</i> (Veron and Pichon, 1982)						+
48	斯氏角孔珊瑚 <i>Goniopora stutchburyi</i> (Wells, 1955)				+		+
49	二异角孔珊瑚 <i>Goniopora duofasciata</i> (Thiel, 1932)	+			+		
50	澳头角孔珊瑚 <i>Goniopora wotouensis</i> (Zou et al, 1987)	+					
51	<i>Lobophyllia</i> sp.				+		

a) 朴素扁脑珊瑚和精巧扁脑珊瑚为同种异名, 现统一将“精巧扁脑珊瑚”作为种名; “+”表示发现该种