

珊瑚共生虫黄藻密度结合卫星遥感分析 2007 年南沙群岛珊瑚热白化

李淑^{①②}, 余克服^{①②}, 陈天然^{①②}, 施祺^{①②}, 张会领^{①②}

① 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广州 510301

② 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

E-mail: lishucoral@gmail.com

2010-10-19 收稿, 2010-12-30 接受

国家自然科学基金(40830852, 41025007)、国家重点基础研究发展计划(2007CB815905)和国家科技支撑计划(2006BAB19B03)资助

摘要 以珊瑚大量损失共生虫黄藻为特征的珊瑚白化, 是当今全球变暖背景下珊瑚礁大面积死亡和退化的主要因素, 但白化的特征、过程和自化后的恢复等则因海域环境不同而有所差异. 依托 2007 年 6 月的南沙群岛航次, 在美济礁和渚碧礁进行了实地生态调查和采样, 室内分析了珊瑚共生虫黄藻密度、近 10 年来南沙海域实测海表温度(SST)和调查期间的 NOAA 卫星遥感资料, 探讨了 2007 年发生在南沙群岛的珊瑚白化事件. 研究结果显示: (1) 白化的珊瑚主要分布在水深 5 m 以内, 最大可至 20 m, 至少有 35 种石珊瑚白化; (2) 珊瑚总白化率(单位面积内白化珊瑚个数占总珊瑚个数的比例)为 15.6%, 发生白化最严重的为枝状杯形珊瑚(白化率为 23%)和鹿角珊瑚(白化率为 21%), 块状滨珊瑚和蜂巢珊瑚的白化率低, 没有发现菌珊瑚白化, 显示了菌珊瑚对高温有较高的耐受性; (3) 白化了的珊瑚损失了共生虫黄藻 72%~90%, 而肉眼观察未白化的珊瑚也损失了 31%~53%的虫黄藻, 指示当时南沙群岛的珊瑚正处于白化的初始阶段; (4) 调查期间实测月平均 SST 为 30.8℃, 为 1998 年以来最高, 结合 NOAA 卫星的热点(Hotspot)和周热度指数(DHW), 认为 2007 年 6 月南沙群岛异常高 SST 是导致美济礁和渚碧礁珊瑚白化的主要原因. 本研究还发现, 单纯用卫星遥感预警珊瑚白化事件可能会存在低估的现象.

关键词

珊瑚白化
虫黄藻密度
异常高温
南沙群岛
美济礁
渚碧礁

珊瑚白化是指在环境胁迫下, 珊瑚共生关系破裂而导致珊瑚损失大量共生虫黄藻而引起的珊瑚变白的生态现象, 可由异常高温、极端低温、强紫外辐射、疾病、细菌感染和盐度降低等因素引起^[1]. 现今普遍认为, 全球变暖背景下的夏季异常高温是导致大规模珊瑚白化和珊瑚礁退化的最主要因素^[2,3], 如 1997~1998 年异常高温导致了全球大面积珊瑚白化, 造成全球珊瑚礁损失了 16%^[4]. 受全球变暖的影响, 目前全球约 1/3 的珊瑚处于灭绝边缘^[5], 仅约 46%的珊瑚礁处于健康状态^[6], 因此对珊瑚白化现象的研究已经引起国际上的高度重视.

我国南海现代珊瑚礁初步估计约 8000 km²^[7], 以

南沙群岛珊瑚礁面积最大、珊瑚生长最繁盛, 长期以来对我国的海洋生物多样性维持、海产资源供给和国防建设等方面发挥着重大的作用. 因此, 大面积珊瑚白化、死亡事件的发生对南沙群岛珊瑚礁资源的可持续利用是极其不利的, 有必要对这类事件进行监测和研究. 然而, 迄今为止有关我国南沙群岛乃至整个南海珊瑚礁受全球变暖等因素而白化的直接信息并不多, 这在很大程度上是因为研究不全面所致. 因为在 1998 年的全球性的珊瑚白化事件中, 菲律宾附近海域如巴拉望群岛北部(11°N)^[8]和 Bolinao (16°N)^[9]观察到了珊瑚白化, 邻近的南沙群岛理应也有大面积的珊瑚白化. Yu 等人^[10]通过对南沙群岛大型块状

英文版见: Li S, Yu K F, Chen T R, et al. Assessment of coral bleaching using symbiotic zooxanthellae density and satellite remote sensing data in the Nansha Islands, South China Sea. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4390-6

珊瑚死亡年代的研究指出,近200年来南沙群岛曾多次发生过因为高温而引起的珊瑚白化,其中就包括1998年的珊瑚白化事件.由于地理位置偏远和研究方法的局限性,南沙群岛现代珊瑚白化的信息几乎空白,这与“我国珊瑚礁分布面积位列世界第8”的地位不相衬,同时也阻碍了对南沙群岛珊瑚礁在全球变暖背景下的响应过程以及演变趋势的认知,更不利于南海珊瑚礁资源的保护和科学利用.

本文以2007年6月中国科学院南海海洋研究所组织的“南沙航次”为依托,将现场生态调查和室内共生虫黄藻密度定量分析相结合为主要研究手段,结合实测的近10年来南沙群岛SST数据以及美国NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)卫星遥感资料,分析了2007年夏季发生在南沙群岛的珊瑚白化事件的现状、过程,并评估了受灾的程度.

1 研究区域

南沙群岛位于南海南部(4°~12°N, 112°~118°E)(图1),属于典型的区域性热带和赤道带海洋性季风

气候区,年温差变化小.近9年(2000年1月~2008年8月)的年平均海表水温(SST)为28.6℃,月平均SST变化于26.9℃(1~2月)到29.8℃(5~6月)之间.

本研究地点位于南沙群岛的渚碧礁和美济礁.渚碧礁为一近似梨形的封闭型环礁,面积约16.1 km²,礁内潟湖面积约7.05 km²,最大水深24 m(图1A);美济礁位于渚碧礁东南部,是一个近似椭圆形的环礁,面积约46 km²,礁内潟湖面积约36 km²,最大水深30 m(图1B).研究地点分布在渚碧礁东北角(NE)的礁坪和礁前斜坡、西南面(SW)的礁坪(图1A),以及美济礁西北部(NW)的外礁坡、礁坪和潟湖内的点礁、东北部(NE)的外礁坡、南面(S)的礁内坡上(图1B).

2 研究方法

水肺潜水法在南沙群岛的美济礁和渚碧礁随机选择面积约50 m²的区域,统计非白化和白化珊瑚种类、统计非白化珊瑚和白化珊瑚个数(肉眼判断珊瑚群体颜色是否变浅、变白,主要根据现场同种珊瑚健康和非健康个体的颜色深浅的对比),以便分析白化珊瑚所占的比例,同时选择定点区域进行截线条

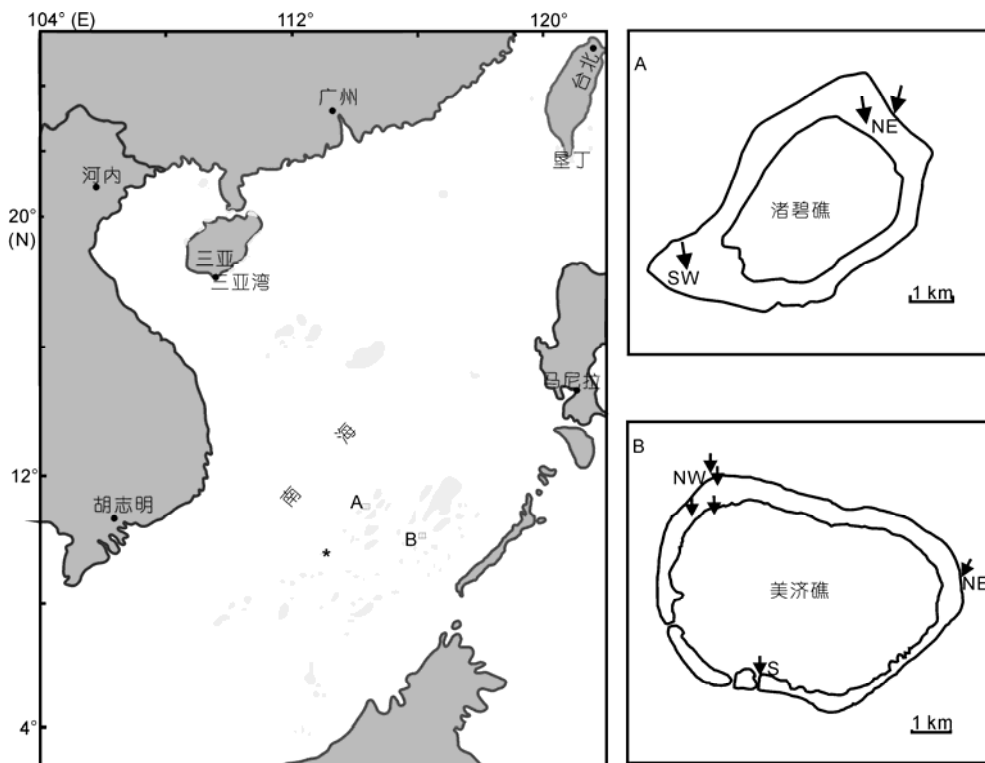


图1 南沙群岛的渚碧礁和美济礁

A, 渚碧礁; B, 美济礁. ★永暑礁. 图中浅灰色表示珊瑚礁分布, 图来源于文献[7]

法录像和样方法拍照. 对于白化珊瑚则拍特写照片用于进一步定种. 采集非白化和白化的珊瑚样品(对枝状和叶片状珊瑚群体采集其3~5个分枝、片; 块状珊瑚群体则凿下面积约40 cm²的小块), 用于分析珊瑚共生虫黄藻密度和参照骨骼细微结构确定珊瑚种; 在实验室内, 将采集的珊瑚小块进行珊瑚共生虫黄藻的分离和虫黄藻密度定量分析^[11,12], 具体方法是先用 Waterpik 冲洗珊瑚小块, 收集匀浆液(虫体组织和虫黄藻混合液)并离心(4000 r/min, 3 min), 倒出上清液并收集虫黄藻(沉积在离心管底部), 固定于1 mL 10%的福尔马林中, 2 h后置于0℃保存. 用血球计数板计算虫黄藻数量, 再换算成总体积匀浆液内所含虫黄藻的数量(A). 用铝箔纸包裹珊瑚骨骼表面, 根据已知铝箔纸的面密度计算铝箔纸的面积, 即珊瑚骨骼的表面积(S). 最后按公式($d=A/S$)计算珊瑚共生虫黄藻的密度(细胞/cm²).

在 SST 观测资料选择上, 采用实测 SST 与卫星资料相结合来显示南沙海域水温的异常. 实测 SST 来自永暑礁(图 1)月平均 SST 数据; 卫星资料来源于美国 NOAA 珊瑚礁勘察检测卫星, 分辨率为 0.5°×0.5°, 用于监测全球 SST 异常并以此对珊瑚白化预警.

3 结果与讨论

3.1 南沙美济礁和渚碧礁白化珊瑚的种类与特征

在渚碧礁 2 个调查点(图 1A)共调查 9 科、14 属、30 种珊瑚, 其中发现了 5 科、6 属、11 种白化珊瑚; 在美济礁 4 个调查区域调查 12 科、25 属、73 种中共发现 7 科、13 属、26 种白化珊瑚(表 1). 渚碧礁礁坪定点调查点共数得 40 个珊瑚, 其中白化 12 个, 白化比例 30%. 美济礁西北角的礁坪上(图 1B 中 NW)有大量白化的珊瑚, 共统计 180 个珊瑚样品, 其中白化珊瑚 49 个, 白化比例占 27%, 主要分布在 5 m 以内, 白化物种有鹿角珊瑚、柱状珊瑚、星孔珊瑚、滨珊瑚、菊花珊瑚、刺星珊瑚、石芝珊瑚等 7 属; 美济礁内礁坡珊瑚生长稀疏, 在水深 20 m 以内, 共统计 50 个珊瑚样品, 其中白化 9 个, 白化比例 18%; 而美济礁的外礁坡珊瑚生长较好, 在调查的水深 50 m 的 305 个珊瑚中, 白化样品仅有 17 个, 占 6%, 主要分布在水深 18 m 以内, 有苍珊瑚、排孔珊瑚、多孔螅、杯形珊瑚、鹿角珊瑚、菊花珊瑚等 6 属; 在美济礁南门口附近的内礁坪和内礁坡上(图 1B 中 S), 共统计 95

个珊瑚样品, 其中白化 18 个, 白化比例 18.9%, 主要集中在水深 5 m 内, 内礁坡水深 20 m 处仍可见鹿角珊瑚白化, 主要有鹿角珊瑚、蔷薇珊瑚、菊花珊瑚、蜂巢珊瑚和滨珊瑚. 总体上, 水深较浅的地点(<5 m)白化珊瑚明显分布较多; 在地貌差异上, 白化珊瑚主要分布在内礁坡和潟湖内点礁上, 而外礁坡分布较少.

所有调查区内珊瑚白化总体特征: 在地貌带分布上以礁坪、内礁坡、潟湖内点礁分布较多, 主要分布在水深 5 m 以内, 最深达 20 m; 在种属分布上枝状珊瑚白化比例最高. 在美济礁的礁坪上生长许多小枝或小块状珊瑚, 这些小枝珊瑚多数已经白化(图 2(a)~(c)); 同时, 也发现传统认为的比较难白化的块状珊瑚, 如滨珊瑚, 也出现整个群体的白化(图 2(d)); 许多较大的鹿角珊瑚呈现苍白或较浅颜色, 显示这些珊瑚群体正处于白化初期(图 2(e)); 由于枝状珊瑚最容易白化, 调查期间看到 20 m 深处仍有正在白化的鹿角珊瑚(图 2(f)). 从珊瑚个体大小(年龄结构)估计, 白化珊瑚年龄大都在 10 a 以内, 即 1998 年以后新生长的珊瑚.

3.2 用珊瑚共生虫黄藻密度指示珊瑚的白化程度

珊瑚白化就是由于珊瑚损失了其共生虫黄藻而变白的生态现象. 因此, 珊瑚共生虫黄藻密度值是指示珊瑚白化程度最直接、最可信的指标. 实测的白化珊瑚虫黄藻总平均密度数据显示(图 3), 鹿角珊瑚为 0.26×10^6 细胞/cm², 杯形珊瑚为 0.17×10^6 细胞/cm², 等于或略低于国际上其他海域报道的白化珊瑚虫黄藻密度值, 如法属波利尼西亚 Moorea 岛白化鹿角珊瑚(0.28×10^6 细胞/cm²)和杯形珊瑚(0.30×10^6 细胞/cm²)的共生虫黄藻密度值^[13]. 而肉眼观测非白化珊瑚共生虫黄藻密度也显示较低值, 如鹿角珊瑚总平均密度为 0.7×10^6 细胞/cm², 低于其他文献报道的 $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$ 细胞/cm²^[12,14-16].

假设以同一季节(2007年5月)三亚湾同种珊瑚虫黄藻密度为基准(因为采样时该区温度没有出现异常), 对比显示调查期间(2007年6月)南沙群岛美济礁和渚碧礁珊瑚共生虫黄藻密度明显处于较低水平(图 3). 统计显示, 白化鹿角珊瑚已经损失约 90% 共生虫黄藻, 而肉眼观察未白化的珊瑚也损失了约 48% 共生虫黄藻; 白化杯形珊瑚损失约 89% 共生虫黄藻, 其非白化珊瑚已损失约 53% 共生虫黄藻; 白化滨

表 1 南沙美济礁和渚碧礁白化珊瑚的种类

科	属	种	
		美济礁	渚碧礁
鹿角珊瑚	星孔珊瑚	多星孔珊瑚 <i>Astreopora myriophthalma</i>	
		繁锦蔷薇珊瑚 <i>Montipora efflorescens</i>	
	蔷薇珊瑚	指状蔷薇珊瑚 <i>Montipora digitata</i>	
		鹿角珊瑚	强壮鹿角珊瑚 <i>Acropora valida</i>
		栅列鹿角珊瑚 <i>Acropora palifera</i>	谷鹿角珊瑚 <i>Acropora cerealis</i>
		鼻形鹿角珊瑚 <i>Acropora nasuta</i>	<i>Acropora digitifera</i>
		美丽鹿角珊瑚 <i>Acropora formosa</i>	<i>Acropora gemmifera</i>
		风信子鹿角珊瑚 <i>Acropora hyacinthus</i>	<i>Acropora prostrata</i>
		<i>Acropora aspera</i>	
		松枝鹿角珊瑚 <i>Acropora brueggemanni</i>	
		<i>Acropora grandis</i>	
		<i>Acropora nobilis</i>	
		<i>Acropora teres</i>	
	假鹿角珊瑚		<i>Anacropora spumosa</i>
杯形珊瑚	排孔珊瑚	箭排孔珊瑚 <i>Seriatopora hystrix</i>	
	杯形珊瑚	疣状杯形珊瑚 <i>Pocillopora verrucosa</i>	疣状杯形珊瑚 <i>Pocillopora verrucosa</i>
	柱状珊瑚	柱状珊瑚 <i>Stylophora pistillata</i>	
蜂巢珊瑚	刺星珊瑚	<i>Cyphastrea microphthalma</i>	
	蜂巢珊瑚	罗图马蜂巢珊瑚 <i>Favia rotundata</i>	
	角蜂巢珊瑚	<i>Favites bestae</i>	
	菊花珊瑚	粗糙菊花珊瑚 <i>Goniastrea aspera</i>	
		<i>Goniastrea ednardsi</i>	
		<i>Goniopora somdiensis</i>	
石芝珊瑚	石芝珊瑚	<i>Ctenactis crassa</i>	刺石芝珊瑚 <i>Fungia echinata</i>
滨珊瑚	滨珊瑚	澄黄滨珊瑚 <i>Porites lutea</i>	<i>Porites solida</i>
			普哥滨珊瑚 <i>Porites pukoensis</i>
苍珊瑚	苍珊瑚	<i>Helioporacea</i>	
多孔螅	多孔螅	<i>Milleporina</i>	
铁星珊瑚	沙珊瑚		<i>Psammocora digitata</i>

珊瑚损失约 72%共生虫黄藻, 非白化珊瑚损失约 45%共生虫黄藻; 白化蜂巢珊瑚已损失约 84%共生虫黄藻, 非白化蜂巢珊瑚已损失约 31%共生虫黄藻; 而菌珊瑚的共生虫黄藻基本没有损失. 从损失比例来讲, 接近于其他海域报道的有关白化珊瑚共生虫黄藻损失比例的数据, 如 1994 年泰国南部布吉岛(Ko Phuket)6 种白化造礁石珊瑚共生藻密度相对于正常颜色珊瑚损失共生虫黄藻约 50%~90%^[17], 印度拉克沙群岛的卡拉蒂(Kavaratti)环礁上白化的鹿角珊瑚损失共生虫黄藻 80%, 块状的滨珊瑚损失共生藻 25%^[18]. 由此可见, 即使许多珊瑚并没出现肉眼可见的白化, 但是从其共生虫黄藻密度值来看, 这些珊瑚已损失了近半的虫黄藻, 显示了这些珊瑚正处于濒临白化的状态, 或者说处于白化的初级阶段. 从以上

可以看出, 虫黄藻密度定量分析手段既可以评估白化珊瑚的白化程度, 也可以发现肉眼未见、却处于白化初始阶段的珊瑚.

3.3 南沙珊瑚物种的白化敏感性分析

50 m² 随机样方内统计数据显示, 美济礁杯形珊瑚白化比例最高(23%), 鹿角珊瑚(21%)次之, 蜂巢珊瑚和滨珊瑚相对较少(<10%). 在调查范围内没有发现菌珊瑚白化(图 4). 各科珊瑚的白化比例均在 30%以下, 调查区平均总白化率(所有白化珊瑚/总珊瑚数)为 15.6%. 从以上数据显示, 枝状的杯形珊瑚和鹿角珊瑚是南沙海域最易白化的珊瑚物种, 块状的蜂巢珊瑚、滨珊瑚和石芝珊瑚相对耐受能力较强, 而在本次调查中没有发现菌珊瑚白化, 可能是南沙海域高

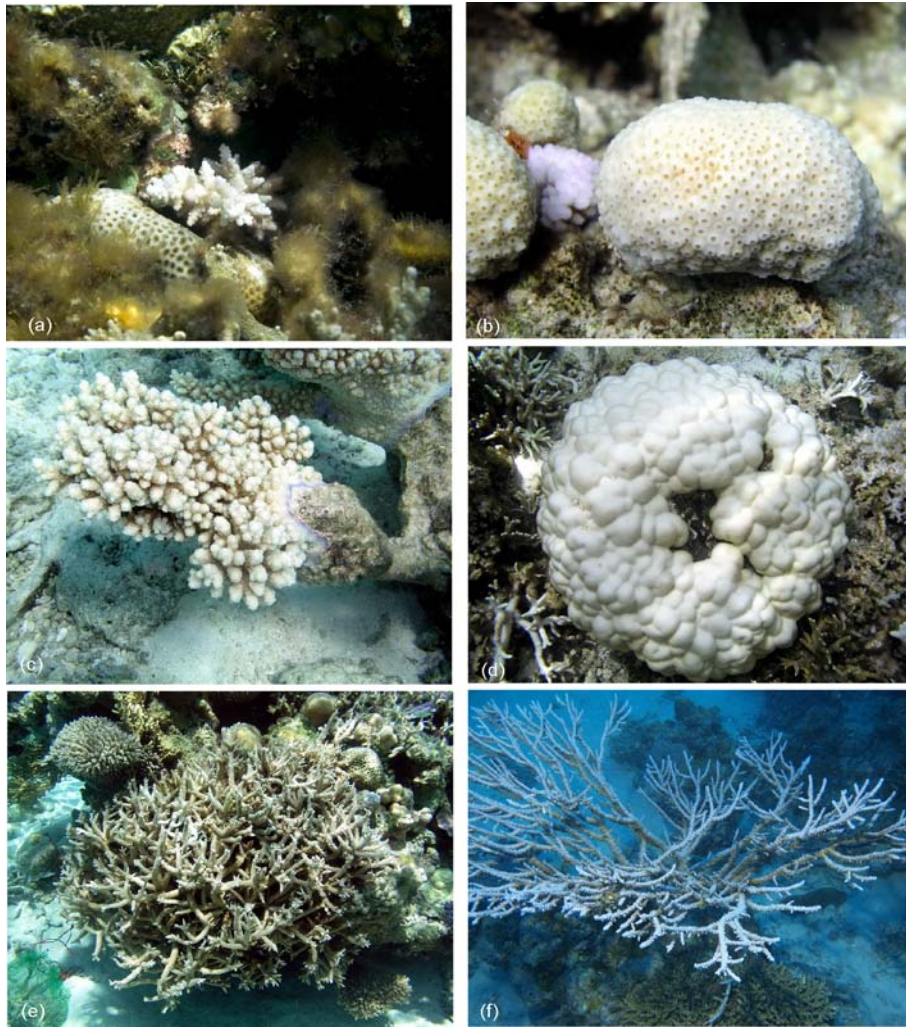


图2 美济礁珊瑚白化照片

(a) 白化的鹿角珊瑚和蜂巢珊瑚; (b) 多星孔珊瑚和杯形珊瑚; (c) 鹿角珊瑚; (d) 滨珊瑚; (e) 鹿角珊瑚; (f) 鹿角珊瑚

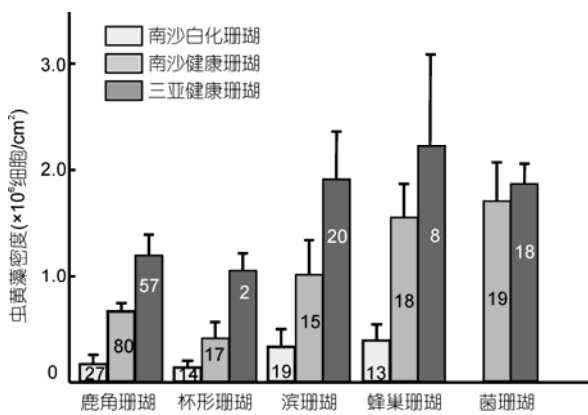


图3 石珊瑚共生虫黄藻平均密度

柱状图中数字表示分析样品数, 数据以 mean±SE 表示

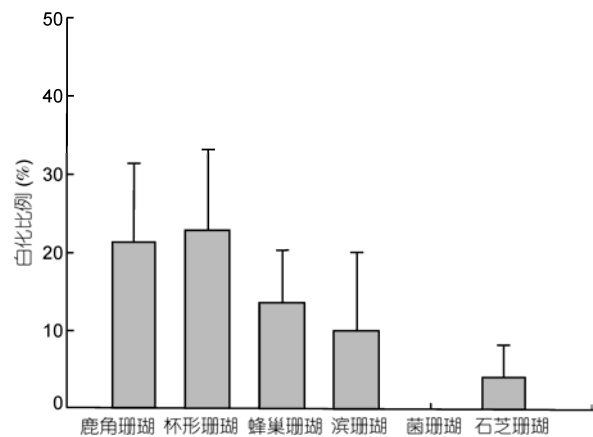


图4 美济礁白化珊瑚的比例分布(mean±SE, n=5)

温耐受力最强、最难白化的珊瑚科。这个结果与我们在海南三亚湾对 5 种造礁石珊瑚的室内养殖箱模拟实验研究的结论^[19,20]相一致, 实验也显示枝状的鹿角珊瑚对温度变化最敏感, 块状的滨珊瑚等次之, 菌珊瑚科的十字牡丹珊瑚对温度耐受性最高。因此, 在全球变暖下菌珊瑚有潜力成为南海较耐环境胁迫的珊瑚物种。

在其他海域也有相类似的研究结果, 如 Stimson 等人^[14]对印度-太平洋区系白化珊瑚的观测和综合比较得出, 易白化死亡的珊瑚物种排序为: 鹿角珊瑚>排孔珊瑚>杯形珊瑚>蔷薇珊瑚>苍珊瑚>蜂巢珊瑚>滨珊瑚, 总体显示鹿角珊瑚和杯形珊瑚是最易白化物种, 蜂巢珊瑚和滨珊瑚次之; Loya 等人^[21]研究显示, 在 1998 年日本海域枝状的鹿角珊瑚和杯形珊瑚白化死亡最严重; Edwards 等人^[22]研究显示, 1998 年马尔代夫 98% 以上的枝状鹿角珊瑚和杯形珊瑚白化死亡, 而块状珊瑚, 如滨珊瑚、蜂巢珊瑚和菌珊瑚等却没有发生白化。

因此, 在南沙美济礁和渚碧礁观察到的不同珊瑚物种白化比例差异显示出的耐受性现象是可靠的, 也符合珊瑚白化的普遍规律。而这样的耐受能力差异性, 可能和珊瑚形态以及共生藻密度含量有关^[12], 如鹿角珊瑚、杯形珊瑚等枝状珊瑚由于其共生虫黄藻密度较低, 出现白化比例最高, 属于最易白化物种, 而块状的滨珊瑚、蜂巢珊瑚等共生虫黄藻密度较高, 白化比例较低(图 3 同样显示杯形珊瑚和鹿角珊瑚共生藻密度较低)。菌珊瑚展现出来的特有耐受性, 很可能成为全球变暖背景下南海较耐环境胁迫珊瑚物种和该区优势种。

3.4 2007 年异常高温导致南沙海域石珊瑚白化

从实测南沙群岛 SST 数据图显示(图 5), 2007 年 6 月是自 1998 年以来南沙群岛夏季平均 SST 最高的月份, 月平均达 30.8℃。同样, 2007 年的上半年升温速率是 12 年以来(1997~2008 年)最快, 达 0.848℃/月, 超过 12 年平均值 0.651℃/月。由于短期的高温之后, 紧接着温度持续降低和光照时间相对少(图 5), 理论上有利于白化后珊瑚的恢复。对比于 1998 年, 发现 1998 年上半年升温速率较低(0.602℃/月), 但异常高温的持续时间最长, 4 个月(5~8 月份)连续性超过 30.8℃, 超过 30.3℃(1998 年全球 47 个大规模珊瑚礁白化的平均温度^[23])的月份达 5 个月, 足以导致该区

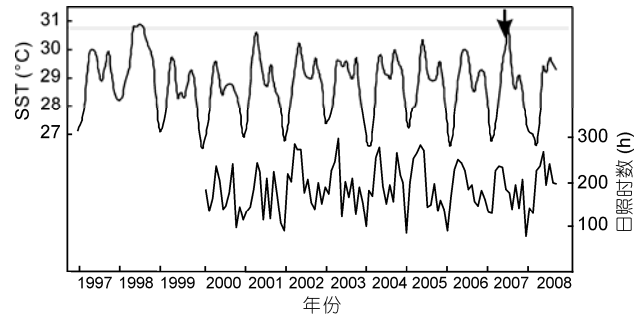


图 5 南沙群岛月平均 SST 和光照度时间变化
数据来自永暑礁水文观测站

大规模珊瑚白化, 并发生大面积珊瑚死亡。本文调查结果显示白化珊瑚基本均是近 10 年以来的新生长珊瑚, 可能与此相对应。

NOAA 的绕极卫星综合数据同样显示了南沙群岛自 2007 年 5 月 21 日开始出现温度异常, 异常高值中心区域在南海东南部(12°N, 118°E), 异常范围在 0.5~1.0℃之间(图 6)。截止到 6 月 28 日, 南沙群岛温度异常值在 0.75~1℃(图 6)。而我们采样和调查时间(截至 6 月 19 日)正处于本次异常高温的前期。调查期间有些珊瑚已经白化, 有些珊瑚正在白化, 而看上去健康的珊瑚共生虫黄藻密度处于较低水平(图 3), 说明此次高温热白化事件很可能处于初始阶段, 而之后的时期(7 和 8 月)有可能达到此次白化事件的高峰期, 出现大面积的、包括大型块状珊瑚整体白化的极端事件, 然而遗憾的是由于航次的限制我们之后未能继续观测。

由于单一的温度异常并不能很好地预测珊瑚是否会发生白化, 异常高温需要累积到一定程度才可能会导致珊瑚白化。为此, Liu 等人^[24]提出利用周热度(degree heating weeks, DHW)指数预测一定区域珊瑚白化的可能性。从南沙群岛周热度图上可以看出, 采样期间周热度均小于 3℃-周(图 7, 蓝色), 表示此时还没有足够的累积热胁迫(至少 4℃-周)足以导致生态意义上的显著性白化^[24]。但是, 此时南沙群岛的渚碧礁和美济礁已经开始出现白化, 说明卫星遥感对南沙群岛珊瑚白化预测可能存在低估现象^[25]。

随着热区不断向南海北部扩张, 到 2007 年 7 月中下旬(图 7(d)), 南海北部台湾南部的垦丁(图 1)发现大规模珊瑚白化事件, 白化主要发生在 5 m 以内, 涉及到 45 种造礁石珊瑚, 以多孔螅和鹿角珊瑚为主, 白化率达 70%, 是继 1998 年以来最严重的一次珊瑚

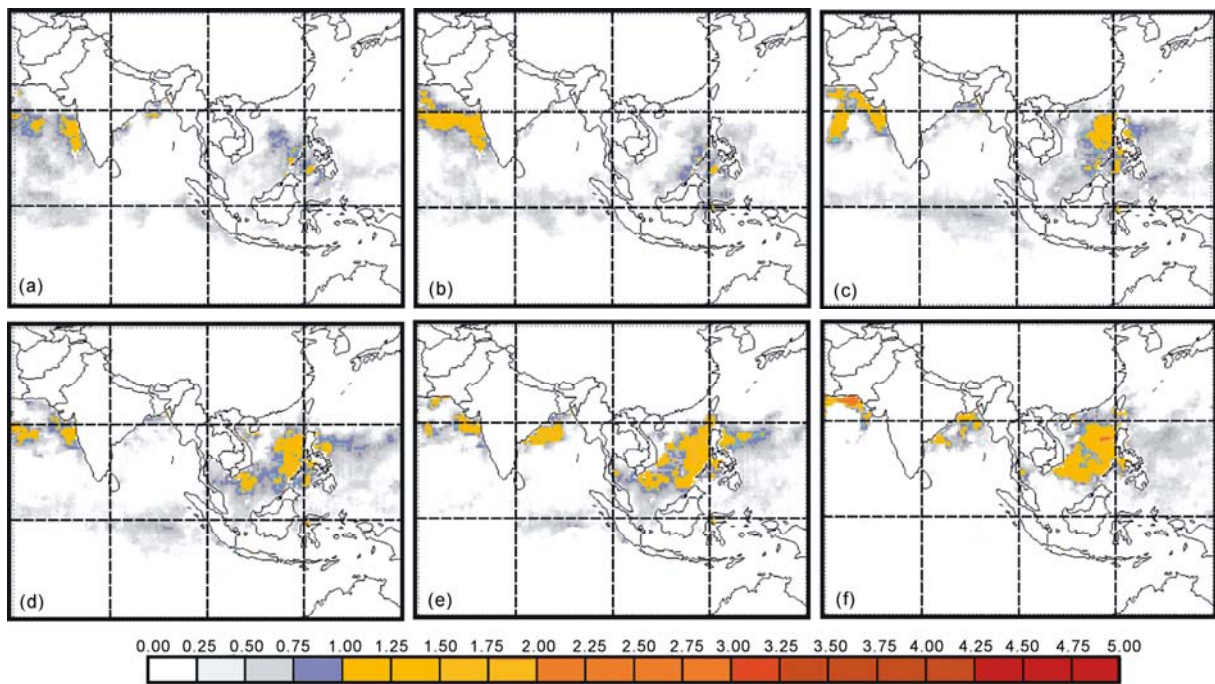


图6 南沙群岛热区图

(a) 2007-05-21; (b) 2007-05-28; (c) 2007-06-07; (d) 2007-06-11; (e) 2007-06-18; (f) 2007-06-28. 颜色条表示 SST 异常值, 单位: $^{\circ}\text{C}$;
 引自 <http://www.osdpd.noaa.gov/ml/ocean/cb/hotspots.html>

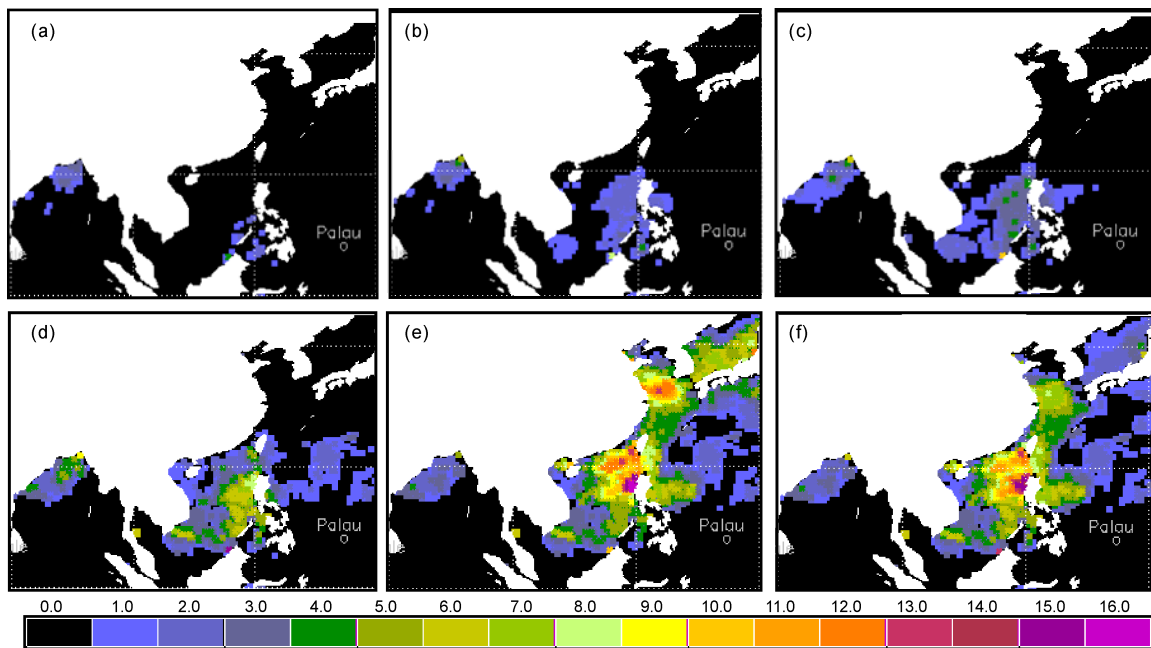


图7 南沙群岛周热度图(周热度是过去12周以来热点 $\geq 1^{\circ}\text{C}$ 的累计热胁迫值(单位: $^{\circ}\text{C}$ -周))

(a) 2007-05-28; (b) 2007-06-11; (c) 2007-06-18; (d) 2007-07-16; (e) 2007-08-16; (f) 2007-08-30. 理论上, 其值达 4°C -周表示此时有足够的累积热胁迫能够导致生态意义上的显著性白化, 而 8°C -周指示可能会出现大范围的珊瑚白化和死亡事件^[24]. 引自 http://www.osdpd.noaa.gov/ml/ocean/cb/dhw_2007.html

白化事件^[26]. 甚至在高纬度日本附近的 Iki, Miyako, Ishigaki 岛等都观察到中到重度的珊瑚白化事件, 并且比 1998 年白化程度更严重^[26]. 然而, 周热度图显示, 7 月 16 日, 在台湾省的累积热胁迫(图 7 中绿色)还不足以导致大面积珊瑚白化(周热度 $>8^{\circ}\text{C}$ -周), 再一次说明卫星遥感预警的珊瑚白化强度可能偏低, 也即在南海预测结果低于实际发生的强度, 至少对南海部分海域珊瑚白化研究上确实存在低估现象. 也从另一角度说明南沙群岛的珊瑚一直处于全球变暖的高敏感海域, 温度的稍微异常变化都会对该海域珊瑚产生较大影响.

4 结论

基于 2007 年 6 月对南沙群岛渚碧礁和美济礁的现场生态调查, 和对白化、半白化和未白化的珊瑚样

品的共生虫黄藻密度分析, 结合实测和卫星遥感资料获得的 SST, 认为 2007 年 6~7 月南沙群岛珊瑚礁发生了珊瑚白化事件. 该次白化事件至少涉及 35 种造礁石珊瑚, 影响的深度范围为 20 m 以内. 枝状的鹿角珊瑚和杯形珊瑚白化最严重, 块状的滨珊瑚和蜂巢珊瑚白化比例较低, 没有发现菌珊瑚白化现象, 表明菌珊瑚科的珊瑚可能是南海耐受性最强的珊瑚种. 器测资料显示调查区域当时月平均 SST 为 30.8°C , 接近于 1998 年导致全球珊瑚礁大幅度退化的异常高温, 但其持续时间远短于 1998 年, 因此本次白化事件对南沙群岛珊瑚礁的危害应低于 1998 年. 结合卫星遥感预警的南海珊瑚白化以及实测的 SST 数据, 认为南沙群岛的珊瑚礁处于全球变暖的高敏感状态中, 卫星遥感预警可能低估了南海珊瑚礁的白化现状.

致谢 感谢王嵘先生在本文野外工作中给予的帮助.

参考文献

- 1 李淑, 余克服. 珊瑚礁白化研究进展. 生态学报, 2007, 27: 2059-2069
- 2 Hoegh-Guldberg O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar Freshw Res*, 1999, 50: 839-866
- 3 Baker A, Glynn P, Riegl B. Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Est Coast Shelf Sci*, 2008, 80: 435-471
- 4 Wilkinson C. Status of Coral Reefs of the World: 2002. Townsville: Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, 2002. 1-377
- 5 Carpenter K, Abrar M, Aeby G, et al. One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. *Science*, 2008, 321: 560-563
- 6 Wilkinson C. Status of Coral Reefs of the World: 2008. Townsville: Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, 2008. 1-296
- 7 Yu K F, Zhao J X. Coral Reefs. In: Wang P X, Li Q Y, eds. *The South China Sea Paleooceanography and Sedimentology*. Berlin: Springer, 2009. 229-254
- 8 Arceo H O, Quibilan M C, Alino P M, et al. Coral bleaching in Philippine reefs: Coincident evidences with mesoscale thermal anomalies. *Bull Mar Sci*, 2001, 69: 579-593
- 9 Cesar H, Pet-Soede L, Quibilan M C C, et al. First evaluation of the impacts of the 1998 coral bleaching event to fisheries and tourism in the Philippines. In: Schuttenberg H Z, ed. *Coral Bleaching: Assessing and Linking Ecological and Socioeconomic Impacts, Future Trends and Mitigation Planning*. Kingston: University of Rhode Island, 2000. 41-58
- 10 Yu K F, Zhao J X, Shi Q, et al. U-series dating of dead Porites corals in the South China Sea: Evidence for episodic coral mortality over the past two centuries. *Quat Geochronol*, 2006, 1: 129-141
- 11 Johannes R E, Wiebe W J. Method for determination of coral tissue biomass and composition. *Limnol Oceanogr*, 1970, 15: 822-824
- 12 李淑, 余克服, 施祺, 等. 南海北部珊瑚共生虫黄藻的种间差异及其对珊瑚礁白化的影响. *科学通报*, 2007, 52: 2655-2662
- 13 Hoegh-Guldberg O, Salvat B. Periodic mass-bleaching and elevated sea temperatures: Bleaching of outer reef slope communities in Moorea, French Polynesia. *Mar Ecol Prog Ser*, 1995, 121: 181-190
- 14 Stimson J, Sakai K, Sembali H. Interspecific comparison of the symbiotic relationship in corals with high and low rates of bleaching-induced mortality. *Coral Reefs*, 2002, 21: 409-421
- 15 Costa C F, Sassi R, Amaral F D. Annual cycle of symbiotic dinoflagellates from three species of scleractinian corals from coastal reefs of northeastern Brazil. *Coral Reefs*, 2005, 24: 191-193

- 16 Fagoonee I, Wilson H B, Hassell M P, et al. The dynamics of zooxanthellae populations: A long-term study in the field. *Science*, 1999, 283: 843–845
- 17 Brown B E, Letissier M D A, Bythell J C. Mechanisms of bleaching deduced from histological studies of reef corals sampled during a natural bleaching event. *Mar Biol*, 1995, 122: 655–663
- 18 Harithsa S, Raghukumar C, Dalal S. Stress response of two coral species in the Kavaratti atoll of the Lakshadweep Archipelago, India. *Coral reefs*, 2005, 24: 463–474
- 19 李淑, 余克服, 施祺, 等. 造礁石珊瑚对低温的耐受能力及响应模式. *应用生态学报*, 2009, 20: 2289–2295
- 20 李淑, 余克服, 施祺, 等. 海南岛鹿回头石珊瑚对高温响应行为的实验研究. *热带地理*, 2008, 28: 534–539
- 21 Loya Y, Sakai K, Yamazato K, et al. Coral bleaching: The winners and the losers. *Ecol Lett*, 2001, 4: 122–131
- 22 Edwards A J, Clark S, Zahir H, et al. Coral bleaching and mortality on artificial and natural reefs in Maldives in 1998, sea surface temperature anomalies and initial recovery. *Mar Pollut Bull*, 2001, 42: 7–15
- 23 Lough J M. 1997-98: Unprecedented thermal stress to coral reefs? *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 3901–3904
- 24 Liu G, Strong A E, Skirving W. Overview of NOAA coral reef watch program's near-real time satellite global coral bleaching monitoring activities. In: *Proc 10th Int Coral Reef Symp*. 2005, 1: 1783–1793
- 25 McClanahan T R, Ateweberhan M, Sebastian C R, et al. Predictability of coral bleaching from synoptic satellite and *in situ* temperature observations. *Coral Reefs*, 2007, 26: 695–701
- 26 Kimura T, Dai C F, Park H S. Status of coral reef resources in East and North Asia (China, Hong Kong, Taiwan, South Korea and Japan). In: Wilkinson C, ed. *Status of Coral Reefs of the World: 2008*. Townsville: Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Center, 2008. 145–158