



论文

海南岛三亚小东海珊瑚礁坪生态沉积分带和碳酸盐沉积作用

王月^{①②}, 沈建伟^{①*}, 龙江平^③

① 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012

* 联系人, E-mail: jwshen@scsio.ac.cn

收稿日期: 2009-11-19; 接受日期: 2010-08-18

国家自然科学基金(批准号: 40976030, 40572072)、中国科学院南海海洋研究所知识创新工程领域前沿项目(编号: LYQY200806)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-228)资助

摘要 海南岛三亚小东海发育有美丽的岸礁, 岸礁礁坪环境向海延伸数十米, 珊瑚礁生态沉积分带明显, 从陆地向海依次为海滩岩、大块礁珊瑚带、礁坪内带、礁坪外带和礁坪前缘斜坡带, 不同的分带有不同的碳酸盐沉积和造礁珊瑚生态群落. 海滩岩的成分主要有珊瑚骨骼、藻类、腹足类、瓣鳃类和底栖有孔虫等生物砂颗粒; 石英砂颗粒含量较少, 成岩作用主要表现为早期胶结作用. 小东海的礁坪是一种向海进积类型的, 礁坪靠海滩岩一侧为大块珊瑚带, 平顶、原地、且已死亡的块状珊瑚分布其中, 大块珊瑚周围是生物砂粒和灰泥沉积; 礁坪内带以死亡的珊瑚居多, 表面包有生物颗粒和灰泥沉积物, 活珊瑚都以块状复体为主, 枝状和其他生态类型的几乎没有. 群落动态变化统计分析显示, 礁坪外带强波浪作用带是造礁珊瑚生长最繁盛和分布最密集区域, 除块状复体的珊瑚大量繁盛外, 枝状的伞房鹿角珊瑚也大量发育, 由于波浪强烈的冲刷作用, 生物颗粒和灰泥沉积物极少. 微生物碳酸盐沉积一般发育在海滩岩的孔穴、珊瑚骨骼空腔和生物颗粒上, 而以后面二者居多; 从海滩岩到礁坪外带的波浪和水流作用变化, 决定了小东海珊瑚礁的生态沉积分带, 微生物碳酸盐沉积一般不在波浪作用强烈和沉积物受冲刷的礁坪外带发育.

关键词

微生物碳酸盐沉积
生态沉积分带
胶结作用
礁坪
海南岛

珊瑚礁是海洋中生物多样性最高, 生物量最丰富的生态系统, 是一个由复杂的物理、化学和生物相互作用形成的生态和沉积的综合体, 其造就了独特的碳酸盐沉积. 珊瑚礁保护海岸, 提供人类旅游、食物和天然药物资源等生活所需; 然而, 在过去三十年间, 珊瑚礁受到人类活动如过度渔业、陆源沉积物和营养盐注入, 以及全球气候变暖的影响, 世界上许多海域

的珊瑚礁正在衰减和变化^[1,2]. 研究海南岛三亚小东海岸礁的生态沉积分带和碳酸盐沉积作用, 不仅可以探讨全球气候变暖和人类活动引起的海水营养盐变化与珊瑚礁中微生物碳酸盐沉积发育的关系, 而且可以确定第四纪冰期以来海平面变化对岸礁生态沉积分带的影响.

以珊瑚礁为主体的沉积环境是众多碳酸盐环境

的一种代表类型. 南海北部雷州半岛南端岬角海岸和海南岛南端及西海岸一带还发育有美丽的岸礁. 此外, 在远离大陆的西沙、东沙和南沙群岛发育有广阔且类型多样的碳酸盐沉积和全球最多姿多彩的珊瑚礁生物和各种类型的珊瑚礁, 其可以和北美巴哈马滩和澳洲大堡礁媲美. 这些珊瑚礁沉积是南海边缘海第四纪沉积的重要特征之一. 西沙、东沙和南沙的珊瑚礁(滩)主要形成在碳酸盐台地、台地边缘和台缘斜坡位置上, 发育有台礁、环礁、点礁、塔礁和台地边缘礁等多种类型. 而西沙珊瑚礁以环礁类型居多, 沉积和生态分带明显, 由外缘礁坡、礁坪、泻湖坡和泻湖和点礁等地貌分带组成, 不同的分带有不同的碳酸盐沉积和造礁珊瑚生态群落^[3].

我国珊瑚礁的研究可追溯到 20 世纪 30 年代^[4], 从 20 世纪 80 年代开始, 由不同的研究机构和科学家组织过几次大规模的南海珊瑚礁资源的考察, 已有的研究成果主要集中在珊瑚分类和描述、骨骼微细构造、珊瑚礁生态和珊瑚骨骼地球化学成分包含的气候和环境变化指标^[5-8], 近年来的工作则侧重于各种测年手段研究珊瑚礁记录的高分辨率海洋环境信息^[9].

在珊瑚礁群落动态变化研究方面早期多为定性的描述, 近年来有些工作开始对海南三亚鹿回头珊瑚岸礁区底栖群落进行定量监测调查和健康评估^[10]. 最近, 对珊瑚礁增长和衰减起重要影响作用的微生物群落和微生物碳酸盐沉积的研究取得了一些进展^[11,12], 但是, 对影响珊瑚礁发育的沉积环境因素、特别是珊瑚礁区微生物碳酸盐沉积包含的环境和气候信息、珊瑚礁区不同碳酸盐沉积环境的造礁珊瑚群落动态变化和珊瑚生长和环境的互动研究还很缺乏. 本文在进行大量野外调查、取样观察及分析的基础上, 对三亚小东海东北岸礁礁坪的生态沉积分带进行了划分, 对礁坪外带造礁珊瑚群落进行了分布和动态变化的统计及研究, 并对礁坪向岸方向的海滩岩及礁坪内、外缘的碳酸盐沉积、微生物沉积作用和早期胶结作用进行了系统研究.

1 研究区地质与地理环境特征

本次研究工作在海南岛三亚鹿回头半岛的小东海岸礁礁坪开展(图 1). 三亚位于中国的南端, 也是

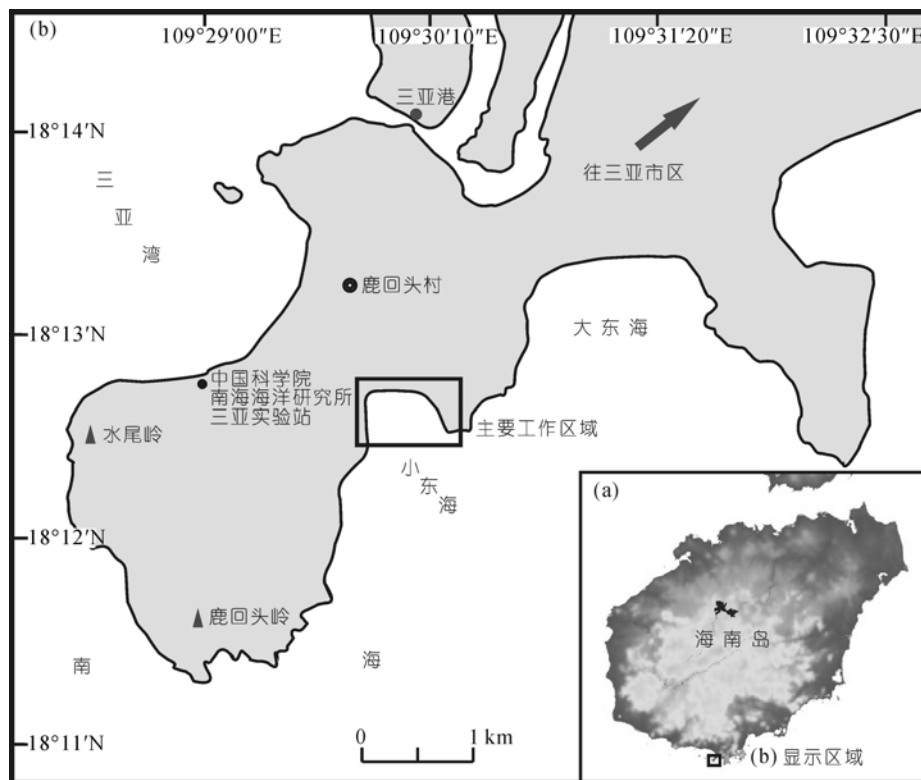


图 1 研究区位置示意图

大陆型岛屿海南岛的最南端。鹿回头半岛位于三亚市的南部,距三亚市约 5 km,是三面临海的半岛。小东海是海南岛比较有代表性的岸礁区之一,位于海南岛南岸最南缘岬角海岸东侧,三亚市与鹿回头岭之间,濒临三亚湾(18°09'34"~18°37'27"N, 108°56'30"~109°48'28"E),三亚湾是椰庄连岛坝西侧一弧形海湾。

三亚湾-鹿回头一带珊瑚礁的基岩,既有下古生界沉积的硅质页岩,又有上古生界的石英岩,但以燕山期花岗岩闪长岩出露为基岩最为广泛。基岩之上为礁坪相生物骨屑砂砾层和滞留砾石层;礁坪相沉积之上为由块状珊瑚组成的礁格架相沉积,厚度 1 m 以上;之上为砾堤相沉积,由珊瑚骨砾层组成^[13]。小东海珊瑚礁位于高波能海岸,是陆地边缘围绕基岩海岸和岛屿发育起来的未成熟型岸礁礁体,具有进积序列的沉积相序,不存在堡礁(或堤礁)礁体类型。依据碳、氧稳定同位素和其他地球化学资料,这些珊瑚礁的主体是 7000~6300 a BP 期间全新世高海平面时期发育起来的^[14,15]。

三亚属于典型的热带海区和海洋季风性气候,多年年平均 SST 为 27.0℃,最低月平均 SST 为 22.8℃(变化于 20.5~24.7℃之间),最高月平均 SST 为 29.8℃(变化于 28.7~30.9℃之间),年表层海水盐度在 33.0‰~34.5‰之间,年平均降雨量 1279 mm,其雨量多集中在 5~10 月台风期。海南岛在冬季风盛行的 10 月至翌年 3 月上旬主要风向是 NE 风;夏季风盛行的 5-8 月主要是 SW 风和 SE 风;在 4 月和 9 月间是冬、夏季风相互转换的过渡季节,盛行风向以偏 E 为主;

风速为 2.0-4.6 m/s^[3]。研究区平均水深 1~3 m,是高海平面与低海平面之间的潮间沉积环境的典型代表,其水动力主要是海浪,其次为潮流。海浪受陆岸制约以偏 S 浪向居多,0~2 级弱浪和小浪占 85%以上;潮流作用较弱,平均潮差小于 1 m^[3]。

鹿回头湾和小东海海滩岩属于岩礁海岸海滩岩,发育于基岩和珊瑚礁岛波影区或珊瑚礁平台后侧,多为背叠式砂砾海滩岩,海滩岩露头窄、坡陡,具有数道陡坎,在岛礁背风侧常发育不同阶段的连岛坝^[16]。

2 研究方法

对小东海礁坪沉积地貌进行划分(图 2),用 GPS 定位和测量尺对小东海泳场东北边的礁坪进行面积测量,沿东西方向导线进行生态沉积相带观察、描述和相带宽度测量。对礁坪中各种死去和现生的珊瑚进行识别,描述和分类,利用 1 m×1 m 网尺对造礁珊瑚群落进行素描、定位、照相和统计,连续素描、测量和照相 45 m²,获取礁坪沉积环境下造礁珊瑚群落的发育和分布资料。用 GPS 对海滩岩出露和保存情况进行勘测,以一定的间距采集样品。沿礁坪外带剖面系统采集碳酸盐沉积样品,以备进行微量元素分析。本次调查和研究的测量数据、实地照片、素描图和样品采集等工作均在野外现场进行;而数据统计、面积计算、照片拼接、造礁珊瑚素描图分类、各种统计图表绘制、岩石样品切片和微量元素分析样品送样前期处理均在室内完成。

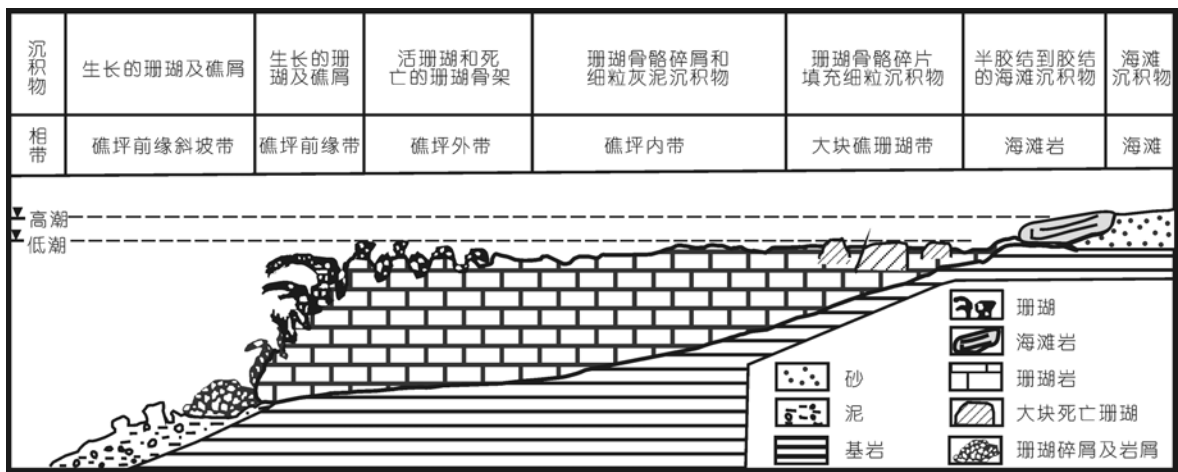


图 2 三亚小东海岸礁生态沉积环境分带

3 小东海珊瑚礁坪生态沉积分带

工作区选取在小东海礁坪的东北部分(图 3), 其和西南部分被一海水浴场分开, 样方统计区在礁坪的最东端, 靠近小东海东边突出的岬角(图 3). 小东海海域水质良好, 海水透明度大, 水下 80 多种珊瑚种群发育良好, 属典型的岸礁生态系统. 小东海礁坪在低潮时期全部出露, 从高潮线附近海滩岩至珊瑚礁坪前缘呈阶梯型地貌结构, 其礁坪上的珊瑚礁多为全新世高海平面的产物, 并在当时高海平面珊瑚礁繁盛期形成了现在的珊瑚礁地貌格局^[15]. 小东海东北岸礁坪环境向海延伸数十米, 珊瑚礁生态

沉积分带明显, 从陆地向海依次为海滩岩、大块礁珊瑚带、礁坪内带、礁坪外带和礁坪前缘斜坡带(图 2), 不同的分带有不同的碳酸盐沉积和造礁珊瑚生态群落.

(1) 海滩岩. 海滩岩在小东海东北岸和西南岸均有分布, 其中东北岸面积相对较小, 在高潮线附近, 低潮时完全出露, 海滩岩呈平行海岸线走向发育, 由于人为开采取作建筑材料, 加上海浪海蚀作用和风化作用, 海滩岩露头断续分布. 本文研究的海滩岩走向为 SE110°, 是保存最好的一块海滩岩露头, 长 100 m 左右, 最宽处达 10 m 以上(图 4), 向海陆两侧逐渐尖灭, 向下被松散砂砾堆积层掩盖, 向上为海浪和风

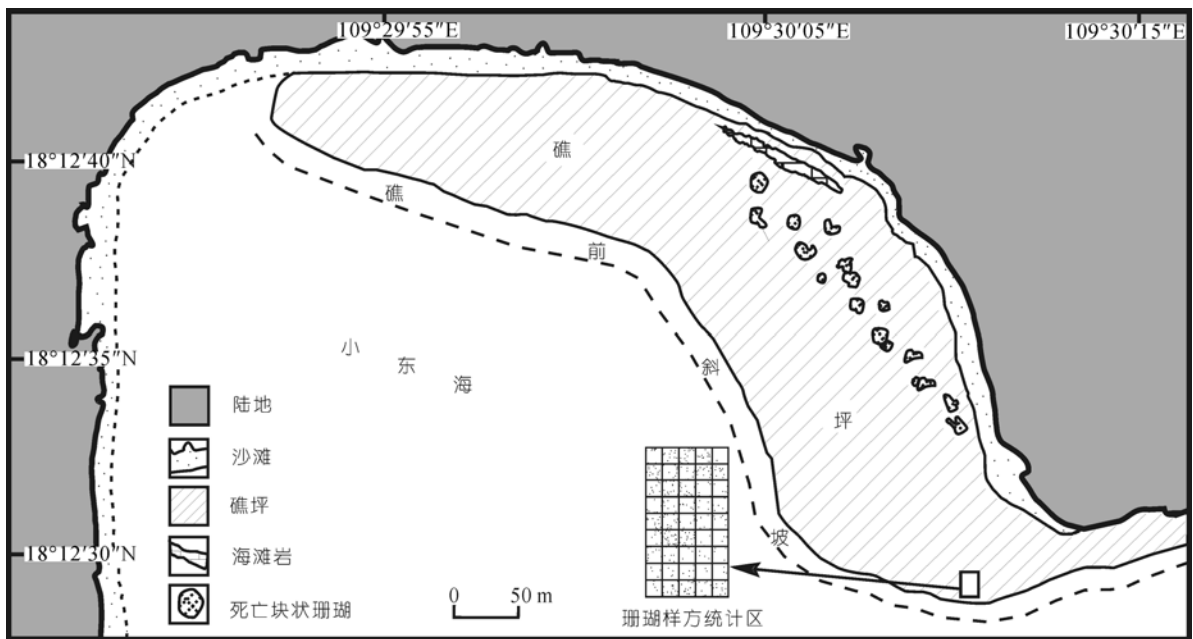


图 3 三亚小东海东北礁坪工作区示意图

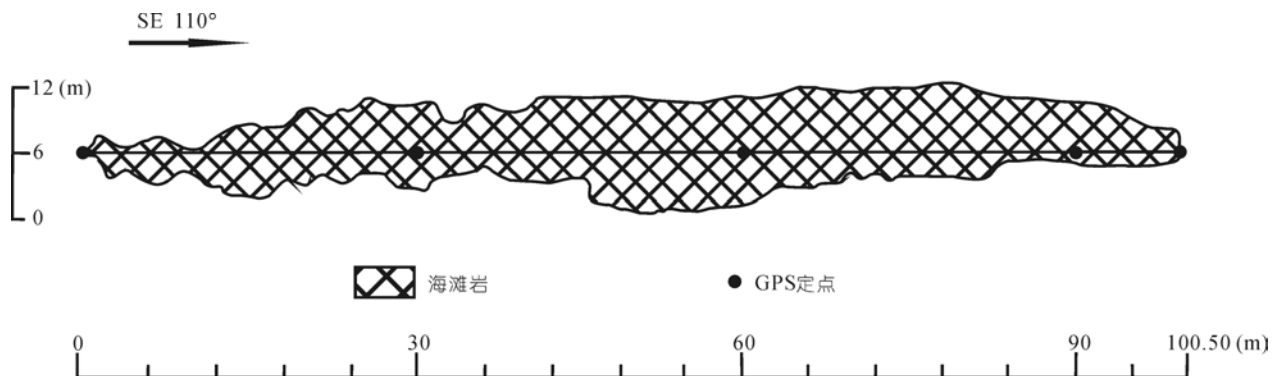


图 4 三亚小东海东北礁坪区海滩岩露头

成的沙丘。海滩岩由大量的珊瑚碎块组成, 其中鹿角珊瑚的碎枝占主要部分, 其他为腹足类和瓣鳃类生物碎屑, 显微镜下观察有珊瑚、藻类、腹足类、瓣鳃类和底栖有孔虫等生物砂颗粒, 成岩作用主要为早期胶结作用, 石英砂颗粒含量较少, 因此; 岩性显得松脆, 属于半胶结到胶结碳酸盐岩。

(2) 大块礁珊瑚带。海滩岩往海方向为一低洼区, 低潮时海水不能退净, 形成一个宽阔、平坦和几厘米(高潮时几十厘米)水深的浅水塘, 低潮时水流循环受局限, 其中有很多大型块状礁珊瑚, 其多为滨珊瑚, 不过这些珊瑚已全部死亡, 表面形状以不规则圆形或卵圆形居多, 珊瑚顶部非常平坦, 不知是潮水冲刷形成, 还是受当时的水深影响, 不能往上生长, 而是往横向扩张。这些大块礁珊瑚多为本地原生, 并非风浪后期搬运所至, 多生长于 7300~6000 a BP 全新世高海平面时期^[15]。工作中实地测量了 20 块大小不等的大块珊瑚, 其大小多在 0.5~5 m², 其中出露面积最大一块达 24 m²左右, 突起、平顶的大块珊瑚之间为不规则的潮道, 堆积有潮水冲刷带来的珊瑚骨骼碎片和细粒的灰泥, 所有这些成分都是来自珊瑚礁本身, 骨骼砂砾磨圆度和分选都很好, 较大的复体珊瑚碎块很少。

(3) 礁坪内带。礁坪内带是低潮时经常暴露在水上的部分, 地势比大块礁珊瑚分布的区域要高。由于礁坪的向海进积, 逐渐远离波浪强作用带和露出水面的时间增长, 再加上赶海人的踩踏和对珊瑚礁伴生生物的采集(如腹足类、瓣鳃类和一些软体动物), 珊瑚基本上都已死亡, 死亡珊瑚的表面都覆盖有骨骼碎屑和灰泥沉积物。潮水偶尔带来的珊瑚虫可在这些死去的珊瑚上着床, 并发育生长, 这些珊瑚主要为中华扁脑珊瑚(*Platygyra sinensis*) (图 5)。清晨观察时可以发现, 这些直径 5~10 cm 的块状复体珊瑚都朝着东边太阳升起的地方生长, 都喜于阳光充裕的潮间环境。

(4) 礁坪外带。本次工作研究的礁坪外带通常情况下被海水淹没, 只是天文低潮时短暂露出水面, 2008 年 6~8 月正逢天文低潮期, 潮水下降比往年都低, 礁坪外带在潮位最低时大部分露出水面(图 6(a)), 给我们的观察、统计和研究提供了绝好的机会, 获得了非常宝贵的第一手野外资料。礁坪外带紧邻礁前斜坡, 经常被潮水淹没, 是一个特殊的海洋沉积和生态地带, 其海水动力、富养程度、透光强度、浪击深



图 5 中华扁脑珊瑚(*Platygyra sinensis*)
铁钎长=27.5 cm

度和沉积基底受侵蚀等方面都具有特殊性。这里波浪作用中等至强、沉积物来源多且沉积速率高、营养物质供应充分、透光好、造礁珊瑚种类多且生态类型多样(图 6(b)), 是对海平面、突发气候和海洋参数变化最敏感的沉积带。由于所处较高能量带, 波浪可强烈作用到沉积基底, 所以这个带的沉积物主要以下部死亡的珊瑚骨架和上部活着的造礁珊瑚为主, 在死亡的珊瑚骨架缝隙间有少量骨骼颗粒和灰泥沉积。

(5) 礁坪前缘斜坡带。礁前斜坡亦称礁坪前坡, 坡度达 50°以上, 其上限与珊瑚丛生带呈过渡渐变关系, 平面上呈槽沟与礁脊相间排列的锯齿状槽沟-礁脊系, 礁前斜坡一般为硬底质。以群体生活的各种各样分枝状类型的珊瑚为主, 有的呈灌木丛状, 小枝顶端尖细; 有的为分枝粗短, 枝体呈锥状; 又有的分枝并不规则, 顶端呈扭曲的薄片状。有些地方, 整片都是一丛丛细长分枝的美丽鹿角珊瑚(*Acropora formosa* Dana)和由主枝和小枝形成巨大的掌状或荷叶状的是匍匐鹿角珊瑚(*Acropora prostrata* Dana), 在较陡的礁前斜坡, 可以看到一些粗大结实的枝体迎浪生长。

4 造礁珊瑚群落动态分析

三亚小东海珊瑚礁位于高波能海岸, 附近无大的污染源, 人类干扰较小, 珊瑚生长态势较好。小东海有造礁珊瑚 87 种, 生长较密集, 分布面积大, 从 2~3 m 左右到 50 m 水深均有生长。本次研究工作对三亚小东海珊瑚礁坪的造礁珊瑚群落种群结构、珊瑚

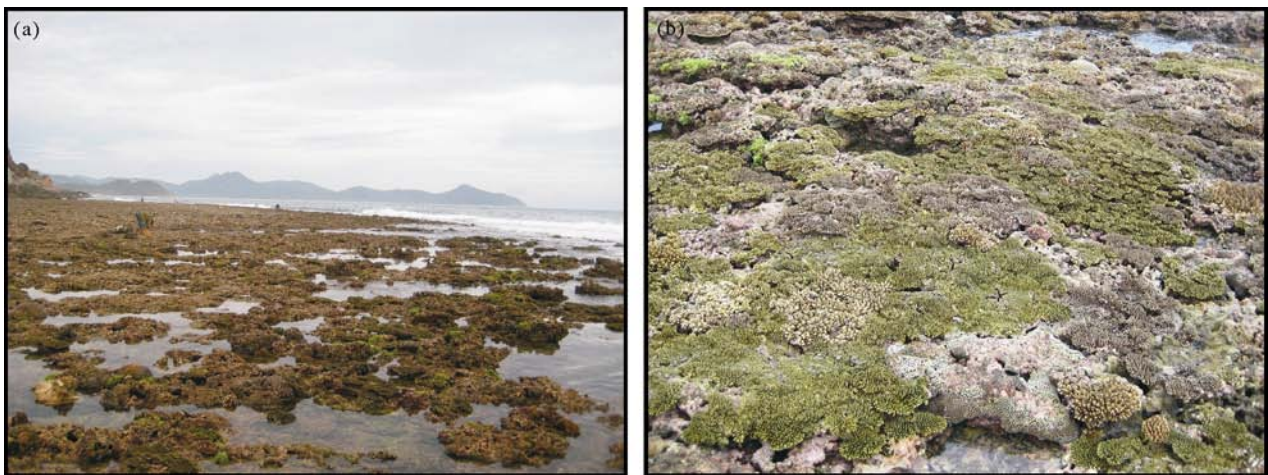


图 6 海南三亚小东海礁坪

(a) 东北礁坪区低潮期出露情况; (b) 靠近礁前斜坡处生长繁茂的珊瑚

丛体大小和分布进行了定量和连续的调查和统计, 检视礁坪不同地点造礁珊瑚群落的时空变化, 并且确定造礁珊瑚群落骨骼沉积与微生物碳酸盐发育之间的时间和空间关系。

本次研究在礁坪外带紧邻礁前斜坡的区域选择了一块往海方向长 9 m, 横向宽 5 m 的小区块进行造礁珊瑚群落动态素描、照相、观察和统计工作, 实测面积为 45 m² (图 7)。统计区位于小东海礁坪东南角。网尺为 1 m×1 m 样方框, 样方框分为 4×4 共 16 小格, 每个样方的四个角都用 GPS 定位。野外对每一个样方中的珊瑚种属进行识别、划分、并做详细素描, 配合每个样方 4 张数码相片, 以备室内工作时对获得的素描资料进行修正。统计区内分布有各种造礁珊瑚 10 个属以上, 主要是蔷薇珊瑚 (*Montipora* sp.)、扁脑珊瑚 (*Platygyra* sp.)、鹿角珊瑚 (*Acropora* sp.)、滨珊瑚 (*Porites* sp.)、蜂巢珊瑚 (*Favia* sp.)、角蜂巢珊瑚 (*Favites* sp.)、杯形珊瑚 (*Pocillopora* sp.)、盔形珊瑚 (*Galaxea* sp.)、沙珊瑚 (*Psammocora* sp.); 并发现一处软珊瑚 (图 8)。经过室内对珊瑚种属的检证, 对各属珊瑚分布、个体大小和发育情况的归类和统计, 统计区域内以死亡的珊瑚骨架为主, 占统计面积的 74.27%; 活体珊瑚面积达 11.58 m², 占统计面积的 25.73%。活体珊瑚分为枝状与块状复体两类进行统计, 其中枝状珊瑚面积为 1.89 m², 块状珊瑚为 9.69 m²。

从各类造礁珊瑚在统计范围内所占面积大小分析, 蔷薇珊瑚所占面积最多, 达 4.04 m², 约占统计区

面积的 9.0%, 占活体珊瑚的 34.89%, 在造礁珊瑚中占绝对优势。其次是枝状的鹿角珊瑚和复体的角蜂巢珊瑚、扁脑珊瑚和蜂巢珊瑚, 这 4 属珊瑚在统计区内的面积总和是 7.43 m², 占活体珊瑚面积的 64.16%, 而且这 4 属珊瑚的造礁功能明显比蔷薇珊瑚重要。其余的 4 属造礁珊瑚 (滨珊瑚、杯形珊瑚、盔形珊瑚和沙珊瑚) 的分布面积总和占活体珊瑚分布面积的 0.95%。其中软珊瑚仅发现一处, 面积微不足道。盔形珊瑚和沙珊瑚的面积也仅为 0.0075 和 0.023 m²。

对各类造礁珊瑚空间分布进行分析, 将统计区由陆向海 (礁坪内缘至礁坪外带) 分为三个区域:

(i) 0~400 cm 为统计区靠礁坪内缘一侧, 分布有造礁珊瑚 4 个属, 分别是蔷薇珊瑚、鹿角珊瑚、扁脑珊瑚和滨珊瑚, 以大面积分布的蔷薇珊瑚和扁脑珊瑚为主, 零散分布有鹿角珊瑚和滨珊瑚。

(ii) 400~700 cm 区域, 造礁珊瑚分布面积较之前一个区域明显增加, 发现 5 个珊瑚属, 分别是扁脑珊瑚、蔷薇珊瑚、鹿角珊瑚、角蜂巢珊瑚、蜂巢珊瑚和沙珊瑚, 其中以扁脑珊瑚、鹿角珊瑚和蔷薇珊瑚为主, 其他 2 属珊瑚较少, 值得注意的是 2 类主要造礁珊瑚 (扁脑珊瑚和鹿角珊瑚) 明显增多。

(iii) 700~900 cm 区域, 礁坪外带紧邻礁前斜坡, 珊瑚面积明显增多, 分布有 7 属造礁珊瑚, 分别是扁脑珊瑚、鹿角珊瑚、角蜂巢珊瑚、蔷薇珊瑚、杯形珊瑚、盔形珊瑚和沙珊瑚, 此外, 还见到一处软珊瑚。该区域有大面积的角蜂巢珊瑚、鹿角珊瑚和扁脑珊瑚。尤其是角蜂巢珊瑚的大面积出现是这个生态区的重要

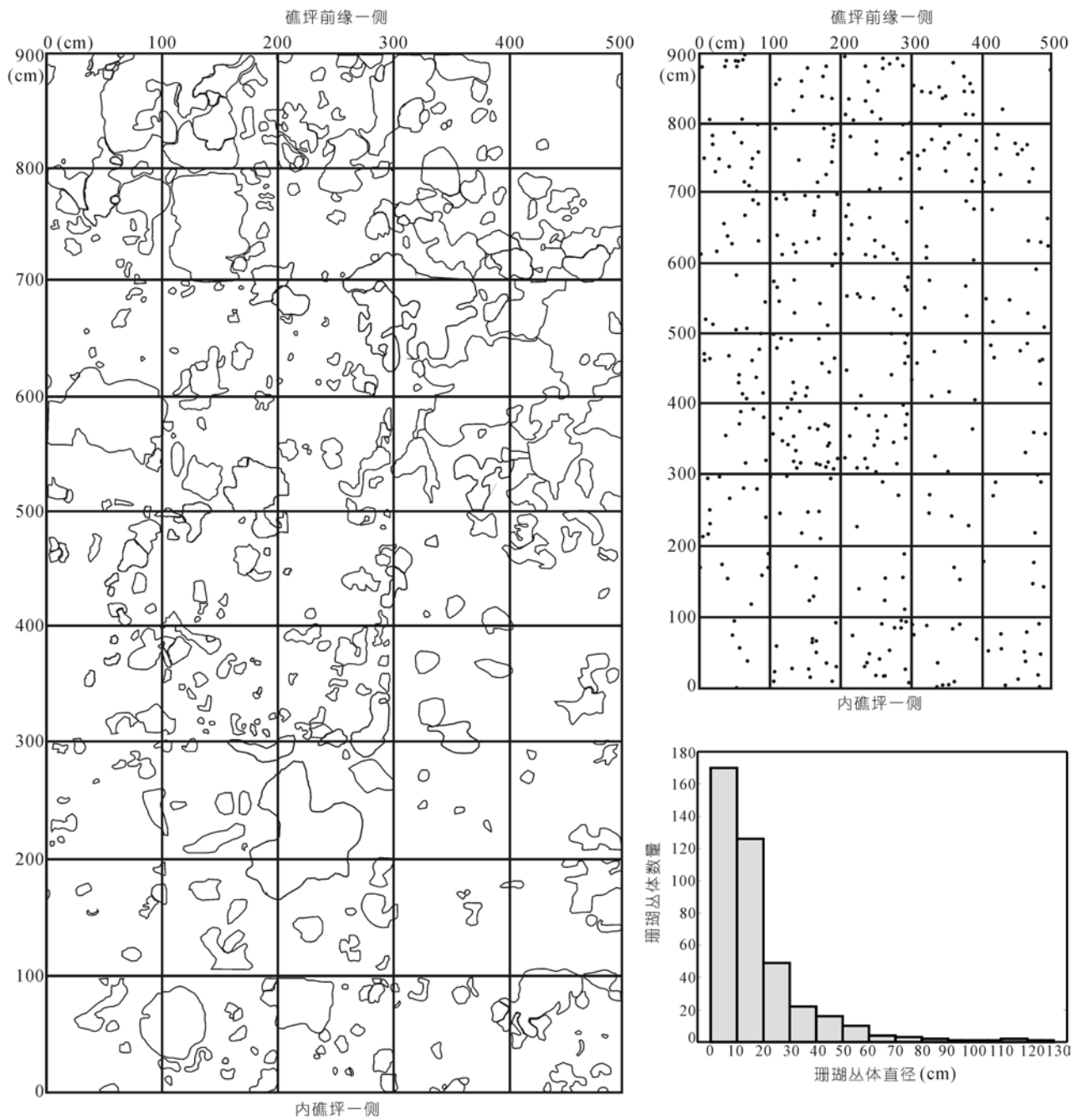


图7 小东海礁坪外带造礁珊瑚群落统计、珊瑚丛体重力点分布及珊瑚丛体大小统计柱状图

要特点,统计区的角蜂巢珊瑚主要集中在该区.之前占优势蔷薇珊瑚在该区域明显减少,杯形珊瑚、盔形珊瑚、沙珊瑚和软珊瑚也只是偶尔发育.

总体看来,从礁坪内缘往礁坪外带方向,也是水动力不断增强的方向,具有强烈造礁功能的角蜂巢珊瑚、扁脑珊瑚和鹿角珊瑚趋于增多和大量发育,而

造礁功能较弱的蔷薇珊瑚则从大量发育到逐渐消失.从珊瑚丛体来看,以鹿角珊瑚为例,其丛体大小以直径10~20 cm之间最为常见(图7),而在礁坪外带紧邻礁前斜坡一侧有的直径可达到1 m左右.盔形珊瑚、沙珊瑚、杯形珊瑚和软珊瑚的生态分带不是很明显.

从各种造礁珊瑚的分布素描图和重力点投影图

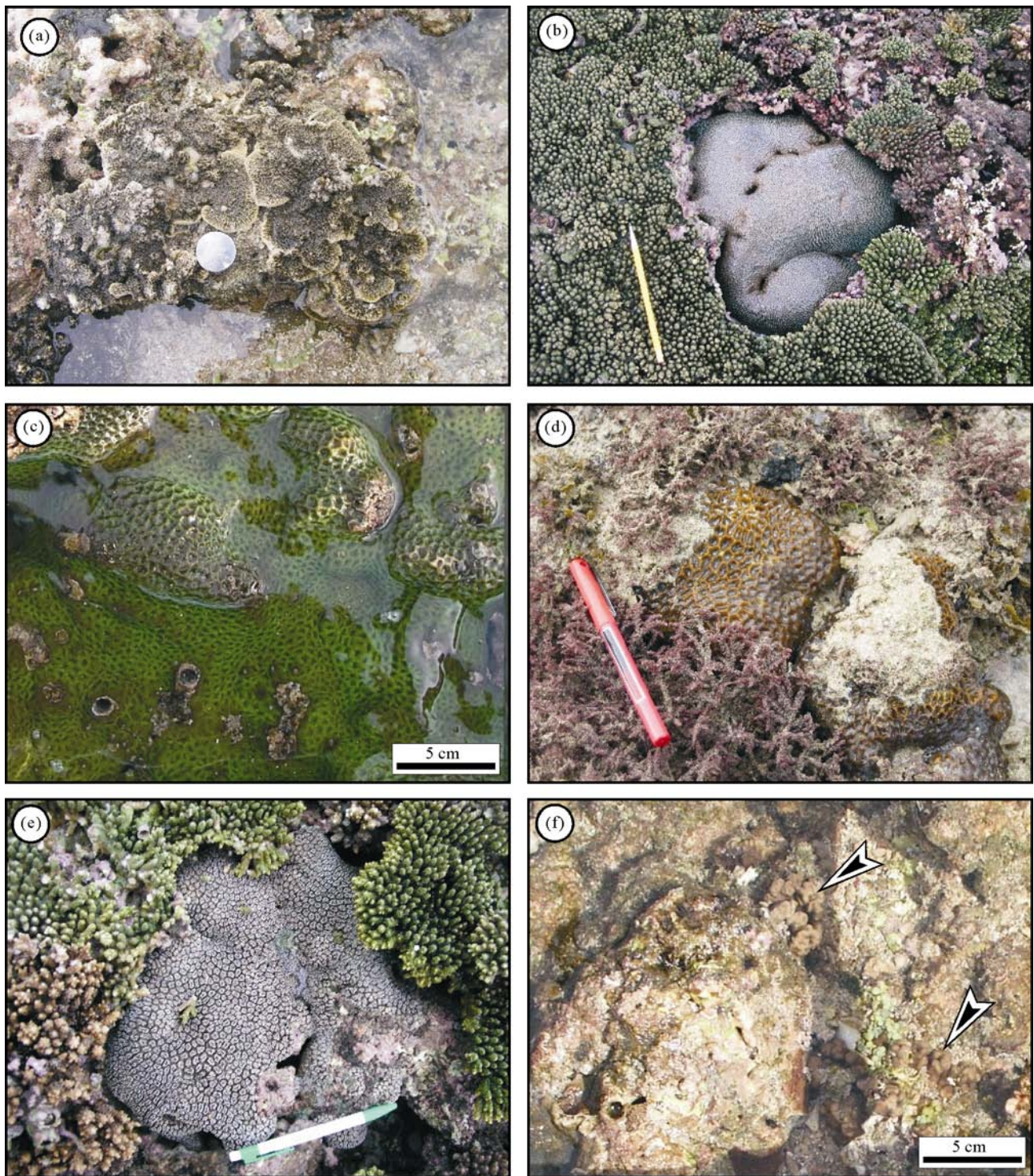


图 8 礁坪外带靠近礁前斜坡生长的主要造礁珊瑚

(a) 蔷薇珊瑚属(*Montipora* sp.)(硬币直径=25 mm); (b) 扁脑珊瑚属(*Platygyra* sp.)和鹿角珊瑚属(*Acropora* sp.)(铅笔长=16 cm); (c) 角蜂巢珊瑚属(*Favites* sp.); (d) 蜂巢珊瑚属(*Favia* sp.)(记号笔长=14 cm); (e) 盔形珊瑚属(*Galaxea* sp.)和鹿角珊瑚属(*Acropora* sp.)(圆珠笔长=14 cm); (f) 箭头所指为沙珊瑚属(*Psammocora* sp.)

(图 7)也可以看出, 往礁前斜坡方向活体珊瑚分布趋于密集, 主要造礁珊瑚发育繁盛, 具有明显造礁功能的珊瑚属种增多, 块状复体的珊瑚增多, 鹿角珊瑚的生态类型也发生变化, 从礁坪内缘典型丛状生态类型到这个区域的低矮、大直径的伞型丛体, 具有明显的抗浪生态功能。

5 海滩岩中微生物碳酸盐沉积

研究结果显示小东海海滩岩的主要岩石成份为珊瑚骨骼颗粒、腹足类和瓣鳃类生物颗粒、底栖有孔虫、藻类碎片、石英砂颗粒和微生物碳酸盐沉积。其中珊瑚骨骼颗粒占 80% 以上, 藻类碎片也很常见, 石英砂颗粒不到 5%, 其他生物骨骼颗粒含量只占比较少的部分。其中石英砂颗粒多为基岩风化及海浪冲刷所至。

海滩岩中的微生物碳酸盐沉积主要发育在珊瑚体表面或生物骨骼颗粒上, 生物骨骼颗粒之间的孔隙中和珊瑚(碎屑和碎块)骨骼孔穴中。微生物碳酸盐沉积一般呈隐晶质的结壳状、叠层状和包覆状, 有些可见微生物的管形丝状体和纹层状的生长纹。生长在珊瑚和其他生物骨骼颗粒表面的微生物碳酸盐沉积为深黑色, 隐晶质, 内部纹层和生长纹不显, 呈皮壳状覆生在珊瑚骨骼颗粒上(图 9(a))。叠层状的微生物碳酸盐沉积呈碎片见于生物骨骼颗粒堆积形成的孔隙间, 显微镜下碎片长 1.2 mm 左右, 高 0.5 mm, 可见清晰、厚度均匀的纹层, 纹层厚度一般在 0.14~0.18 mm 之间, 纹层的横切面上可见细小的黑色斑点, 纹层之间有很薄的、不连续的微晶方解石层隔开(图 9(b))。包覆状的微生物碳酸盐沉积呈不规则和不等厚状生长, 通常发育在珊瑚骨骼的空隙之间, 显微镜下可见其中扇形、放射状生长的微生物叶状体(图 9(c))。微藻类属于微生物的一种, 小东海海滩岩中的微藻类比较常见, 其中皮壳状红藻(可能是 *Lithoporella melobesioides*)内部显示具有不规则皮壳状条带和生殖窠房室的规则细胞结构藻叶状体(图 9(d)), 而外部为规则、等厚、无生殖窠房室, 但具有细小、规则细胞结构的叶状体(图 9(d))。红藻结壳在现代生物礁的形成过程中非常重要, 因为其作用主要是粘结各种颗粒形成抗浪格架。

小东海海滩岩的成岩作用主要表现为早期胶结作用, 微生物的胶结作用主要围绕一些生物骨骼颗

粒发育, 通常以深黑色、均质的有机泥晶形式出现, 但可以转变为浅灰色均匀、等厚和连续的短纤状方解石覆生在长形的生物骨骼颗粒之上, 或呈不规则、厚度不等和不连续地悬垂在这些生物骨骼颗粒之下(图 9(e))。生物骨骼颗粒周围的早期胶结物以针纤状方解石最为常见, 通常围绕未泥晶化或泥晶化的骨骼颗粒形成均一、镶边的纤状文石胶结物, 各种沉积颗粒上均一、等厚的针纤状文石胶结物可以生长愈合在一起, 把这些颗粒紧密地结合在一起; 镶边针纤状文石胶结物平滑地沿颗粒空隙的轮廓生长, 而不是像渗流胶结物那样集中生长在靠近颗粒的接触部位(图 9(f)), 这种胶结物针纤状和均匀、等厚的镶边特征指示一种潮间带的环境特征。

6 讨论

珊瑚礁群落在不同时间和空间尺度上可能表现不同的变动^[17,18], 这种变动主要反映在珊瑚与藻类的数量、珊瑚礁生物的种类组成和珊瑚物种多样性等指数上, 影响群落结构的各相关因子包括短促性的风暴和白化事件^[19,20]和持续性的富营养径流、过度渔业和沉积物成分变化^[21~23], 造礁型珊瑚在其生境中的分布是了解群落变动的内因与外部影响因子以及群落扩张战略的最重要的生态数据之一, 也是了解珊瑚礁群落在波浪、水流和光线等环境因子影响下造礁珊瑚类别、不同生长型覆盖率和群落结构变化的重要海洋环境变量档案。

三亚小东海珊瑚礁坪属于一种典型的岸礁体系, 发育在鹿回头半岛的西侧(图 1), 珊瑚礁直接发育在近岸的晚古生代的石英岩或燕山期花岗闪长岩基岩之上, 代表了一种水体不深(1~3 m)、海水清澈、珊瑚礁生长处于高海平面和低海平面之间的潮间环境, 珊瑚礁坪的发育与海平面基本保持平衡, 而且珊瑚礁坪的顶部一直处于海平面附近。与鹿回头半岛东侧水尾岭的珊瑚礁坪对比(图 1), 小东海的礁坪形成了一个顶部基本平坦、低潮时大部分出露的平台, 潮间带的宽度基本与珊瑚礁平台一致, 从海滩向陆的边界一直到礁坪的前缘, 达数十到几百米, 礁坪前缘向礁前斜坡的坡折处一直处于波浪的强烈作用下; 而水尾岭的珊瑚礁坪在低潮时大部分淹没在水下 1~2 m, 发育活珊瑚的礁体部分离岸有 100~200 m, 波浪对礁坪前缘的作用强度相对较弱, 从海滩岩到

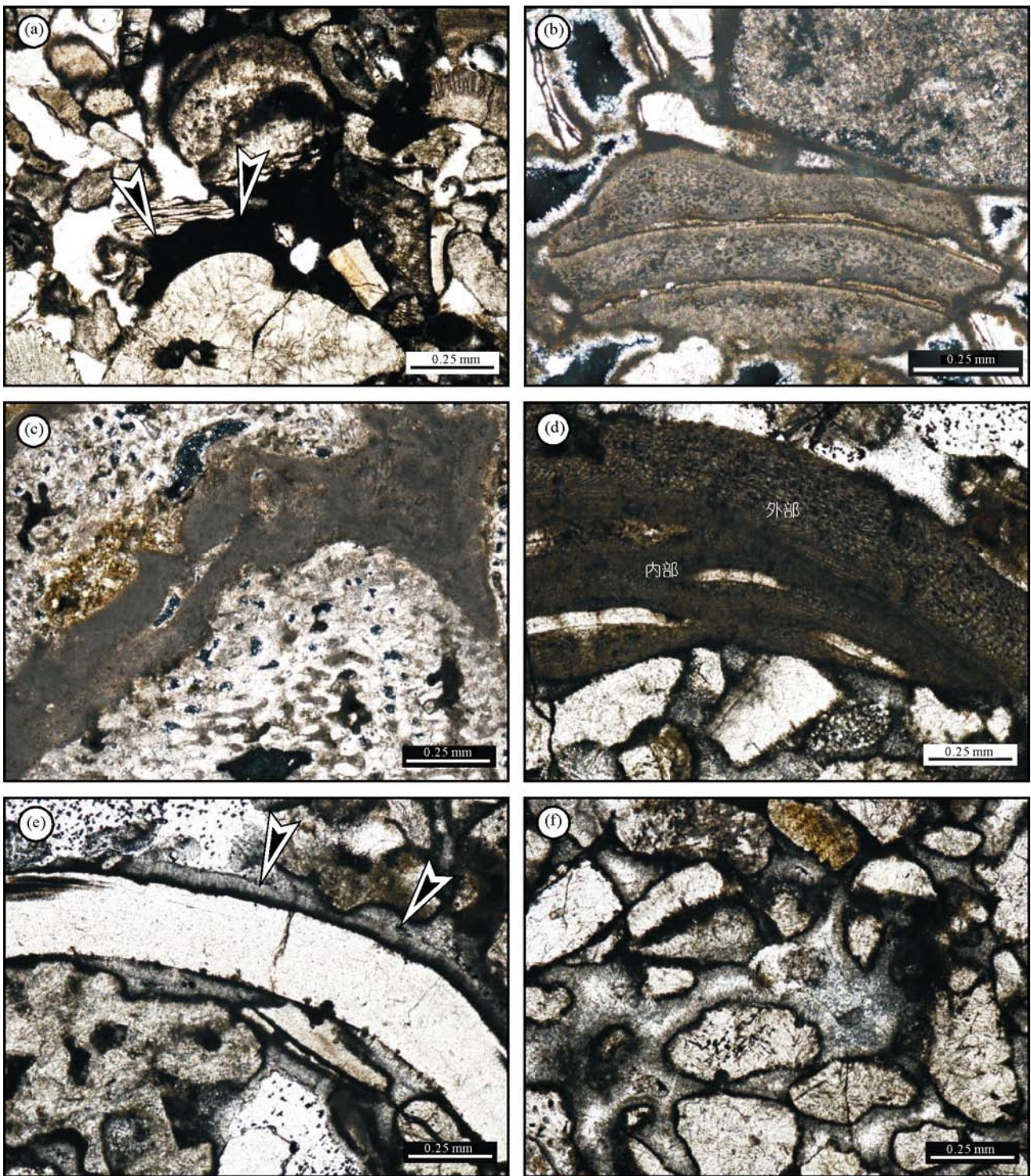


图 9 三亚小东海海滩岩中的微生物碳酸盐沉积和胶结物

(a) 隐晶质的微生物碳酸盐覆生在珊瑚骨骼之上(箭头)(单偏光); (b) 生物颗粒空隙中的微生物碳酸盐沉积, 显示纹层的微结壳结构(正交); (c) 包覆在珊瑚骨骼颗粒上的微生物碳酸盐沉积, 其中可见扇形, 放射状的微生物叶状体(正交); (d) 微结壳状生长的微藻类, 覆生在生物骨骼颗粒之上, 起到固定沉积物颗粒的作用(单偏光); (e) 生物骨骼颗粒之上的微生物胶结物(箭头), 均匀, 等厚的微生物胶结物生长在生物骨骼颗粒之上(单偏光); (f) 围绕生物骨骼颗粒生长的早期胶结物, 呈细纤, 等厚状充填颗粒孔隙(正交)

离岸礁坪之间没有观察到大块礁珊瑚发育带, 潮间带很窄, 其上下范围基本与海滩岩的宽度一致。

从小东海珊瑚礁坪的生态沉积分带可以推测礁坪的发育是一种向海方向进积的形式, 最早发育大块礁珊瑚带, 当时的水深、水质以及基底特征可能最适合这种大型块状复体珊瑚(主要为滨珊瑚)发育, 同样, 在水尾岭中科院南海海洋研究所实验站靠西南方向的海岸也可以零星见到这样的大型块状复体珊瑚, 但往东北方向有海滩岩发育的海岸就没有观察到这样的块状复体珊瑚, 这表明鹿回头半岛东侧和西侧礁坪发育的基底类型、基底起伏特征、海水动力特征和水深、造礁珊瑚种类和生态沉积分带都是明显不同的。

礁坪内带, 主要以死亡的造礁珊瑚骨架和覆盖其上的珊瑚和其他生物骨骼颗粒以及各种碳酸盐灰泥沉积为主, 这里远离波浪的作用, 养分供应不如以前, 低潮时常常暴露在水面之上, 已经不适合于造礁珊瑚发育生长, 偶尔有复体块状珊瑚幼虫在这里殖生, 也仅仅发育成直径很小的块体。礁坪内带生物礁的死亡主要是海平面变化导致的珊瑚礁向海方向进积, 加上人类活动的营养盐注入。礁坪外带, 特别是靠近礁前斜坡的区域是活珊瑚大量发育也是礁坪正在向海生长的区域, 与鹿回头半岛东侧水尾岭的珊瑚礁坪对比, 这里海水很浅, 波浪作用强烈, 水质清澈, 营养物质供应充分, 沉积物受冲刷泥质含量很少, 造礁珊瑚种类多且生态类型多样, 特别是复体块状珊瑚和抗浪、低矮、成片的丛状枝状珊瑚大量发育, 表明海水动力、富养分程度、透光强度、海平面与珊瑚礁坪生长速度的关系, 以及沉积物受冲刷程度等是控制珊瑚礁坪发育的主要因素。小东海珊瑚礁坪前缘的造礁珊瑚群落动态统计也表明(图 7), 水体很浅、波浪作用强烈、透光极好、沉积物受冲刷充分的潮下礁坪外带的前缘部分较之低潮时间断暴露、波浪作用弱、沉积物中泥质和其他悬浮沉积物含量高, 或者处于潮下, 但水体较深、波浪对基底(礁坪最上部生长的珊瑚)作用相对较弱潮坪内带, 造礁珊瑚发育更好, 种类更多, 分布更密集, 而且生态类型多以块状(*Favites* sp., *Favia* sp., *Platygyra* sp.)、密集丛状(*Acoropora* sp.)、低矮平铺伞状(*Acoropora* sp.)和皮壳状(*Montipora* sp.)的珊瑚类型为主, 表明珊瑚的生态类型随各种环境因素而变化的适应机理。

微生物群落及其沉积物被用来作为环境和气候

变化的指标和作为影响珊瑚礁发育的因素是一个新的研究领域。微生物岩是现代珊瑚礁碳酸盐沉积的重要成分, 由矿物沉淀物和沉积物在微生物膜下形成的微生物岩也是全新世生物礁格架的重要组成部分, 占南太平洋塔希提岛 Papaete 大堡礁多达 80% 的骨架成分^[24]。全新世微生物岩中稀土元素以及钇和钆的高含量可能反映了微生物代谢的某些方面^[25,26], 它们已被证明是海水地球化学某些方面可靠的代用指标。通过使用放射性碳测年建立微生物岩生长速率和与珊瑚-藻群落的时间关系来评估其作为环境档案的潜力。

小东海珊瑚礁坪的微生物碳酸盐沉积主要发育在海滩岩中, 与鹿回头半岛东侧水尾岭附近海滩岩中的微生物碳酸盐沉积^[11]不同, 其主要发育在珊瑚体表面或生物骨骼颗粒上, 生物骨骼颗粒之间的孔隙中和珊瑚(碎屑和碎块)骨骼孔穴中, 而水尾岭海滩岩中的微生物碳酸盐沉积大多发育在珊瑚骨骼孔穴中或珊瑚体的表面, 而很少发育在珊瑚和其他生物骨骼颗粒堆积而形成的孔隙中。在小东海海滩岩的珊瑚骨骼孔穴中, 没有观察到水尾岭海滩岩中所具有的叠层状微生物沉积的尖锥体^[11], 但是, 海滩岩中微藻类的含量却明显比水尾岭海滩岩中的要高, 其所具有的粘结沉积颗粒的作用也明显比水尾岭海滩岩中的藻类更重要。鹿回头半岛东侧水尾岭和西侧小东海海滩岩中的微生物碳酸盐沉积和澳大利亚大堡礁南端鹭岛海滩岩中的微生物沉积物一样, 都发育在现代潮间海滩岩珊瑚骨骼中和生物骨骼颗粒之间孔隙的隐生环境。

Krumbein^[27]已证实海滩环境是微生物非常活跃的地点, 但是微生物活动的产物, 特别是碳酸盐沉积环境中微生物活动的产物还不清楚。滕建彬和沈建伟^[11]报道了水尾岭海滩岩中微生物胶结物, 微生物成因的胶结物主要为针纤维晶体和钙化的莓状球体, 这种在季风气候影响下形成的海滩岩中微生物成因的胶结物还是第一次报道; 而小东海海滩岩中的微生物胶结物为深黑色、均质的有机质泥晶覆生在长形的生物骨骼颗粒之上, 或呈不规则、厚度不等和不连续地悬垂在这些生物骨骼颗粒之下, 部分已转变为浅灰色均匀、等厚和连续的短纤维状方解石, 这明显不同于水尾岭海滩岩中的微生物胶结物, 而后的海岸环境受人类活动的影响更为明显。海滩沉积物中碳酸盐胶结物的沉淀作用可以是无机或有机媒介

的^[28,29], 无机途径是大多数的海滩岩胶结过程中的主要方式, 文石作为初期的胶结物, 在大气环境中通过成岩作用转变为高镁方解石或低镁方解石. 小东海海滩岩的早期胶结物以针纤状方解石最为常见, 通常沿生物骨骼颗粒周围生长, 形成均一、镶边的纤状文石胶结物. 微生物胶结是沿生物颗粒生长的薄而等厚, 暗色的部分, 而颗粒空隙中间不等厚、白色的方解石不属于微生物成因的, 其形成晚于薄而等厚, 暗色的部分, 属于不同的世代, 虽然灰泥包壳颗粒孔隙的中间可以看到方解石, 但是显微镜下可见灰泥包壳中扇形、放射状生长的微生物叶状体(图9(c)), 这明显与水尾岭的长纤状文石胶结物不同.

处于潮进、潮退和频繁波浪作用的礁坪外带, 在珊瑚骨骼之上和隐生礁穴及珊瑚骨骼孔穴中都没有发现微生物碳酸盐沉积, 而南沙美济环礁的潮下礁坪环境珊瑚枝体上可以发育绒毛状、发状或细刺状微生物沉积^[12], 这说明微生物碳酸盐沉积一般不在波浪作用强烈和沉积物受冲刷的环境中发育, 它们更趋向于发育在水体安静, 礁坪和海滩岩中的隐生环境.

7 结语

(1) 小东海礁坪在低潮时期全部出露, 从高潮线附近海滩岩至珊瑚礁坪前缘呈阶梯型平台地貌结构, 珊瑚礁生态沉积分带明显, 从陆地向海依次为海滩岩、大块礁珊瑚带、礁坪内带、礁坪外带和礁坪前缘

斜坡带. 其中礁坪外带和礁坪前缘斜坡带是现今珊瑚生长活跃带.

(2) 根据造礁珊瑚群落动态统计分析, 从礁坪内缘往礁坪外带方向, 也是水动力不断增强的方向, 具有强烈造礁功能的角蜂巢珊瑚、扁脑珊瑚和鹿角珊瑚趋于增多和大量发育, 珊瑚丛体直径也呈增大趋势, 而造礁功能较弱的蔷薇珊瑚则从大量发育到逐渐消失. 盔形珊瑚、沙珊瑚、杯形珊瑚和软珊瑚的生态分带不是很明显.

(3) 海滩岩的成岩作用主要表现为早期胶结作用, 微生物主要围绕一些生物骨骼颗粒发育, 以深黑色、均质的有机泥晶转变为浅灰色均匀的短纤状方解石最为常见. 生物骨骼颗粒周围的早期胶结物以针纤状方解石最为常见, 通常围绕未泥晶化或泥晶化的骨骼颗粒形成均一、镶边的纤状文石胶结物.

(4) 海滩岩中的微生物碳酸盐沉积一般呈隐晶质的结壳状、叠层状和包覆状, 有些可见微生物的管行丝状体和纹层状的生长纹, 其主要发育在珊瑚表面, 生物骨骼颗粒上或骨骼颗粒之间的空隙和珊瑚(碎屑和碎块)骨骼空穴中. 根据鹿回头半岛东侧水尾岭和西侧小东海海滩岩中微生物碳酸盐沉积发育特征, 对比南沙美济环礁礁坪和澳大利亚大堡礁南端鹭岛海滩岩中的微生物沉积物, 可以得出结论, 波浪作用强烈和沉积物受冲刷的环境不适合微生物碳酸盐沉积发育, 它们更趋向于发育在水体安静的礁坪和海滩岩的隐生环境中.

致谢 对审稿专家就本文提出的宝贵意见表示感谢.

参考文献

- 1 Hughes T P, Baird A H, Bellwood D R, et al. Climate change, human impacts, and resilience of coral reefs. *Science*, 2003, 301: 929–933
- 2 Pandolfi J M, Bradbury R H, Sala E, et al. Global trajectories of the long-term decline of coral reef ecosystems. *Science*, 2003, 301: 955–958
- 3 赵焕庭, 张乔民, 宋朝景, 等. 华南海岸和南海诸岛地貌与环境. 北京: 科学出版社, 1999. 1–528
- 4 马廷英. 造礁珊瑚与中国沿海珊瑚礁的成长率. *地质论评*, 1936, 1: 293–300
- 5 聂宝符, 梁美桃, 朱袁志, 等. 南海礁区现代造礁珊瑚类骨骼细结构的研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. 1–147
- 6 赵焕庭, 宋朝景, 朱袁智. 南沙群岛“危险地带”腹地珊瑚礁地貌与现代沉积特征. *第四纪研究*, 1992, 4: 203–212
- 7 赵焕庭, 温孝胜, 孙宗勋. 南沙群岛珊瑚礁自然特征. *海洋学报*, 1996, 18: 61–70
- 8 余克服. 造礁珊瑚骨骼 $\delta^{13}\text{C}$ 及其反映的环境信息研究概况. *海洋通报*, 1999, 18: 82–87
- 9 Yu K F, Zhao J X, Wang P X, et al. High-precision U-series and AMS ^{14}C dating for a coral reef lagoon sediment core from southern South China Sea. *Quat Sci Rev*, 2006, 25: 2420–2430
- 10 张乔民, 施祺, 陈刚, 等. 海南三亚鹿回头珊瑚岸礁监测与健康评估. *科学通报*, 2006, 51(增刊II): 71–77
- 11 滕建彬, 沈建伟. 海南岛鹿回头水尾岭海滩岩中的微生物碳酸盐沉积研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 1338–1348

- 12 沈建伟, 王月. 中国南沙美济环礁中微生物碳酸盐沉积及其环境意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 284–298
- 13 赵希涛, 彭贵, 张景文. 海南岛海岸全新世地层与海平面变化的初步研究. 地质科学, 1979, 4: 350–357
- 14 张明书, 刘健, 李浩, 等. 海南岛周缘珊瑚礁的基本特征和成礁时代. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 2: 25–43
- 15 黄德银, 施祺, 张叶春. 海南岛鹿回头与全新世高海平面. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25: 1–7
- 16 毛龙江, 张永战, 魏灵, 等. 海南岛三亚湾海滩研究. 第四纪研究, 2006, 3: 477–484
- 17 Edmunds P J, Bruno J F. The importance of sampling scale in ecology: Kilometre-wide variation in coral reef communities. *Mar Ecol Prog Ser*, 1996, 143: 165–171
- 18 Connell J H, Hughes T P, Wallace C C. A 30-year study of coral abundance, recruitment, and disturbance at several scales in spaces and time. *Ecol Monogr*, 1997, 67: 461–488
- 19 Hughes T P, Connell J H. Multiple stressors on coral reefs: A long-term perspective. *Limnol Oceanogr*, 1999, 44: 932–940
- 20 McClanahan T R. Bleaching damage and recovery potential of Maldivian coral reefs. *Mar Pollut Bull*, 2000, 40: 587–597
- 21 Szmant A M. Nutrient enrichment on coral reefs: Is it a major cause of coral reef decline? *Estuaries*, 2002, 25: 743–766
- 22 Pandolfi J M. Coral community dynamics at multiple scales. *Coral Reefs*, 2002, 21: 13–23
- 23 Dikou A, Woesik R V. Survival under chronic stress from sediment load-spatial patterns of hard coral communities in the southern island of Singapore. *Mar Pollut Bull*, 2006, 52: 7–21
- 24 Camoin G F, Gautret P, Montaggioni L F, et al. Nature and environmental significance of microbialites in Quaternary reefs: The Tahiti paradox. *Sedim Geol*, 1999, 126: 271–304
- 25 Webb G E, Kamber B S. Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: A new shallow seawater proxy. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 1557–1565
- 26 Webb G E, Kamber B S. Biogenicity inferred from microbialite geochemistry. *Microbiol Austral*, 2004, 24: 36–37
- 27 Krumbein W E. The year of the slime, In: Krumbein W E, Paterson D M, Stal L J, eds. *Biostabilization of Sediments*. Oldenburg: Bibliotheks und Informations System der Universitaet Oldenburg, 1994. 1–7
- 28 Strasser A, Davaud E, Jedoui Y. Carbonate cements in Holocene beachrock: Example from Bahiret el Biban, southeastern Tunisia. *Sediment Geol*, 1989, 62: 89–100
- 29 Gischler E, Lomando A J. Holocene cemented beach deposits in Belize. *Sediment Geol*, 1997, 110: 277–297