论文

西沙永兴岛珊瑚礁坪的群落动态和浅水碳酸盐沉积特征

沈建伟^{①*}, 杨红强^{①②}, 王月^①, FeiXue FU^③, 赵娜^{①②}

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

② 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;

③ Department of Biological Sciences, University of Southern California, California 90089, USA

* E-mail: jwshen@scsio.ac.cn

收稿日期: 2013-03-10; 接受日期: 2013-06-08; 网络版发表日期: 2014-01-17

国家自然科学基金项目(批准号: 40976030, 41006029)、国家自然科学基金国际合作与交流项目(批准号: 41210104029)和中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目(编号: SQ201114)资助

摘要 使用线截取断面和潜水装备对西沙永兴岛珊瑚礁的群落动态、微生物碳酸盐沉积、礁坪前缘(礁脊和礁前)沉积特征进行了大量和连续的水下观察、测量和研究。调查和研究发现, 永兴岛珊瑚礁坪环境的珊瑚生物已大量死亡, 与之相伴的是宏藻类、海草和蓝细菌在礁坪区的广泛发育, 微生物和与微生物活动有关的碳酸盐沉积也见于礁坪区, 活体珊瑚生物主要生长在礁坪前缘(礁脊和礁前)位置, 但也处在急剧衰减中。永兴岛东南珊瑚礁坪从岸向海可以分为沙滩、内礁坪、外礁坪、礁坪前缘(礁脊和礁前)以及礁前斜坡, 沉积相带可以划分为礁前斜坡、礁脊和礁前、礁坪和海岸带。沉积物以礁相碳酸盐沉积为特征, 可分为珊瑚骨架沉积、珊瑚碎块沉积和生物碎屑沉积三种类型。随着礁坪带环境恶化和水质趋差, 珊瑚生物的群落动态变化表现出以宏藻类和苍珊瑚为主的生物群落逐渐占领礁坪, 而以石珊瑚为主的生物群落则主要分布于礁脊水质良好、水循环畅通和水能量适合的地方。礁坪前缘(礁脊)覆盖率的统计表明, 浪花鹿角珊瑚(*Acropora cytherea*)的覆盖率达 28% 以上, 是绝对的优势种, 并且以抗浪的生态类型为主。永兴岛的东南礁坪前缘(礁脊和礁前)与北部和西北连接石岛的礁坪前缘的沉积特征明显不同, 前者以不连续的潮道和礁前各种形状和不同水深的礁塘为特征, 而后者则以典型的突起脊-槽沟(spur-and-groove)系统为特征。研究显示, 绒毛状生长的微生物(*Lyngbya* sp.)通常发育在内礁坪或礁坪前缘(礁脊)的礁塘中, 这两种生境通常具有相对封闭和水流不畅的特征。藻类的普遍发育指示了一种富营养的海水环境, 礁坪上珊瑚表面发育的微生物也指示海水富营养和水质恶化的情况。

关键词群落动态
珊瑚礁沉积带
浅水碳酸盐沉积
礁坪前缘特征
永兴岛

人类活动和全球气候变化引发的珊瑚礁区海水的富营养化已经对热带珊瑚礁造成了毁灭性的打击

(Hoegh-Guldberg, 1999; Wilkinson, 2004; Hallock 等, 2004; Crabbe, 2007), 西沙群岛珊瑚礁礁坪环境的珊

中文引用格式: 沈建伟, 杨红强, 王月, 等. 2014. 西沙永兴岛珊瑚礁坪的群落动态和浅水碳酸盐沉积特征. 中国科学: 地球科学, 44: 472–487

英文引用格式: Shen J W, Yang H Q, Wang Y, et al. 2013. Coral community dynamics and shallow-water carbonate deposition of the reef-flat around Yongxing Island, the Xisha Islands. Science China: Earth Sciences, 56: 1471–1486, doi: 10.1007/s11430-013-4677-3

瑚生物已大量死亡(黄晖等, 2006; 施祺等, 2001), 与之相伴的是蓝细菌和藻类在礁坪区以及藻类在礁脊区的广泛发育(杨红强等, 2014), 与微生物活动有关的碳酸盐沉积也见于珊瑚礁区, 活体珊瑚主要生长在礁坪前缘的礁脊和礁前位置. 礁坪是珊瑚礁向海进积的礁脊连接海岸的一片宽旷的水域, 基底为死亡后固结或半固结的珊瑚礁岩, 其上堆积有珊瑚骨骼碎块、珊瑚砂及生物贝壳等, 表面平缓或发育浅凹地、浅水坑、浅沟和点礁, 低潮时部分或全部出露水面(Blanchon, 2011); 如果礁脊的发育阻隔了礁坪内水流与大洋的循环, 礁坪成为受限或半受限的礁后环境; 礁脊和礁前环境是珊瑚礁环境中浅水向深水的过渡地带(Goreau, 1959; Madin, 2006), 礁前环境垂向上依据不同的珊瑚优势种可以分成若干生态和沉积分带(James, 等, 1985), 不同的垂直分带接受光线的多寡不同(Iglesias-Prieto 等, 2004), 这是一个特殊的海洋沉积和生态地带, 这个区域里的海水动力、富养程度、透光强度、浪基深度和沉积基底受侵蚀等方面都具有特殊性(Madin, 2006), 这里波浪作用中等至强, 至礁前环境更是常年受强波浪作用影响, 沉积物类型特殊, 兼有原地和浅水物源的特点(Precht 等, 2007); 沉积速率从礁前向深水斜坡变化大, 营养物质供应充分, 造礁珊瑚种类多且生态类型多样(Wood, 1998), 是对海平面、突发气候和海洋参数变化最敏感的沉积带(Chappell, 1983; Buddemeier, 1993; Ammar 等, 2006), 不同的分带有不同的碳酸盐沉积和造礁珊瑚生态群落(Rogers, 1990; Aronson 等, 1997), 因此, 礁坪前缘(礁脊和礁前)是研究海水富营养化、蓝细菌爆发和相应的珊瑚群落动态变化及三者之间相互关系的最佳场所. 本文在连续三年的潜水观测和研究的基础上, 阐述了永兴岛珊瑚礁的群落动态、浅水碳酸盐沉积(包括微生物碳酸盐沉积)特征和永兴岛珊瑚礁的礁脊和礁前的发育特征, 讨论了永兴岛珊瑚礁坪群落动态变化的影响因素, 永兴岛珊瑚礁坪前缘发育特征和影响因素以及蓝细菌和藻类对永兴岛珊瑚礁生态系的影响, 认为人类活动的增加正在加剧影响永兴岛礁坪的珊瑚生物和珊瑚礁发育.

1 研究区自然环境条件

西沙群岛位于南海的西北部, 海南岛东南方,

15°40′~17°10′N, 111°00′~113°00′E, 以永兴岛为中心, 距三亚市榆林港和文昌市清澜港都是 330 km. 西沙群岛是我国南海四大群岛之一, 由永乐群岛和宣德群岛组成, 共有 22 个岛屿, 7 个沙洲, 另有 10 多个暗礁和暗滩, 形成了一个三万平方公里海域的珊瑚岛礁群. 永兴岛位于西沙群岛东北部宣德群岛的一个礁盘上(图 1), 是一座由白色珊瑚贝壳沙(Cay)堆积在礁平台上而形成的珊瑚岛, 地势平坦, 平均高约 5 m, 岛中部为干涸潟湖. 永兴岛又名“林岛”, 地理坐标为 16°50′N, 112°20′E, 是南海 200 多个岛屿中面积最大的一个岛, 呈不规则椭圆形, 长轴 NW-SE 方向, 长度约为 1800 m, 短轴 NE-SW 方向, 长度约为 1200 m. 岛屿东西长约 1900 m, 南北宽约 1400 m, 面积大约为 2.1 km², 最高点位于西北部, 海拔为 8.2 m(赵焕庭等, 1996).

由于风向、水动力的差异及人类生活和开发活动的影响, 永兴岛的东南礁坪与北以及西北礁坪不对称, 在礁坪宽度、分带特征和礁坪前缘的发育特征等方面存在很大差异, 东南礁坪宽约 400~600 m, 而西北和北部礁坪宽 400~900 m. 礁坪向岸与沙滩相连, 向海经礁坪前缘(礁脊和礁前)进入礁前斜坡. 礁坪由原地死亡的珊瑚骨架、风浪打碎的珊瑚骨骼和潮汐水流改造成的生物骨骼砂和灰泥堆积而成, 向岸生物骨骼砂和灰泥增加, 向礁坪前缘方向骨骼砾石增加. 礁坪上生长着海草、藻类、节肢类、贝类、微生物、海葵和少量石珊瑚及软珊瑚. 石珊瑚和软珊瑚的生物量往礁坪前缘方向明显增加, 并呈现礁坪不同分带有不同生物群落相对应的特征. 永兴岛西侧是人类活动较为集中的场所, 有 2 个 5000 t 级码头, 船只在此海域活动频繁.

永兴岛属热带海洋季风气候, 其特点是冬季盛行偏北季风, 夏季盛行偏南季风; 年太阳辐射量大, 终年高温, 多年平均气温达 26.3℃, 最冷月平均温度 22.8℃, 极端最低温 15.3℃. 日照时间长, 年均降雨量为 1509.8 mm, 风力大, 蒸发快. 潮汐作用属不正规全日潮, 平均潮差为 0.9 m. 表层海水平均温度为 26.8℃, 海水透明度一般达 20~30 m. 海浪以风浪为主, 平均波高 1.5 m, 最大为 11.0 m(陈史坚等, 1989).

2 研究方法

野外调查和研究工作在永兴岛礁盘的东南礁坪

图1 西沙群岛主要岛、礁和滩分布图

(飞机场外)和北以及西北礁坪(石岛与永兴岛新开港口之间)开展(图 2). 永兴岛是珊瑚礁盘露出水面的部分, 礁坪环绕岛屿发育, 岛屿和礁坪都是由珊瑚和其他生物骨骼生长和堆积而成, 但礁坪的发育规模在不同的方向上是有差别的. 礁坪与露出水面的岛屿相连, 向海经礁坪前缘(礁脊礁前)过渡到礁前斜坡, 然后进入深海盆.

野外工作用 GPS 定位, 以一定的间距在研究区布置垂直海岸线(或礁坪前缘走向)的线截取断面(用长 50 m 测量卷尺丈量)和统计区域(由 n 样方覆盖的区域), 运用水下观测方法对礁坪、礁坪前缘(礁脊和礁前)环境蓝细菌和微生物碳酸盐沉积及相应的珊瑚群落种群结构沿等间距线截取断面进行连续的水下样方测量、照相和摄像以及统计和分析, 对礁坪至礁前环境中各种死去和现生的珊瑚进行记录、识别、鉴定、描述和分类, 追踪礁盘不同风向和水流方向礁坪前缘发育特征和地形地貌特征. 线截取断面开始和结束处都用 GPS 定点记录数据, 沿测线用 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方逐一对选定范围内的造礁珊瑚种类进行素描、定位、照相和统计, 内礁坪每隔 10 m 布置 1~2 个样

方进行统计, 至礁坪前缘的礁脊处则布置连续和一定面积的样方进行素描、照相和统计, 对造礁珊瑚群落种群结构、分布、珊瑚丛体大小进行定量和连续的调查、监测和统计, 检视礁坪不同地点造礁珊瑚群落的时空变化. 通过礁坪和礁坪前缘(礁脊和礁前)环境的潜水调查和观测, 记录和统计珊瑚生境中蓝细菌的产出特征、丰度、覆盖率和分布范围, 系统采集蓝细菌和其他微生物的活体标本, 了解蓝细菌的种群特征、生物量和发育持久性.

3 永兴岛礁盘分带特征

不同的珊瑚种群和形态类型在珊瑚礁生态系统中偏爱不同的生境, 这些小生境具有不断变化的水波能量、水温、水化学和光照强度, 珊瑚在生物礁中的这种分布的变化形成了很多珊瑚礁环境中的珊瑚生态分带, 这种分带的表现形式可以因岸礁、台礁、环礁和堡礁等礁发育形态的不同而不同, 但是, 在大多数生物礁中可以总结出一些基本的分带模式, 一个最典型的模式是这些生物礁都可以分出礁坪(礁

图 2 西沙永兴岛礁盘(包括岛屿和礁坪)示意图以及研究剖面和水下调查测线分布图

后)、礁脊或藻脊、向海的礁前和礁前斜坡,如永兴岛东南礁坪的分带(图 3).

3.1 礁坪

礁坪(在有些情况下又叫礁后),是近岸的一个带,是从海岸延伸到礁脊(分隔礁坪和礁前斜坡的生物礁的最高部分)的一片浅水水域,礁坪的地貌特征取决于礁坪的发育位置和生物礁的类型,宽度上可以从几米到几公里,水深可以从几厘米到几米.由于这个区域的水体很浅,部分礁坪可以在退潮时暴露在水面之上,这时处于较高温度和光强度下暴露的礁坪(礁体)将阻碍珊瑚的生长,不过尽管有这些压力,这个区域内的珊瑚可以免于受到礁脊和礁前所经受的

波浪压力的影响.

3.2 礁脊(礁核)

礁脊远离海岸,处于礁坪(礁后)和礁前之间.大多数印度-太平洋的珊瑚礁(也有一些加勒比海的珊瑚礁)的礁脊是由被称为藻脊的、在退潮时暴露的远离和平行海岸的水下隆起构成,这是一个生物礁伴有最大波浪作用的区域,以钙质红藻为主,所以称为藻脊,也有一些珊瑚可以在波浪作用不强的礁脊生长,典型的是可以忍受中到强波浪作用的,形态短粗的分枝珊瑚,许多加勒比海珊瑚礁脊大量生长着掌状鹿角珊瑚(*Acropora palmata*).永兴岛礁坪前缘的礁脊特征与印度-太平洋的不同,以造礁石珊瑚为主,

图3 永兴岛东南礁坪地貌沉积分带和生物群落分布

藻类并不是主要的造礁生物。

3.3 礁前和礁前斜坡

礁前和礁前斜坡也是远离海岸, 处于礁脊向大洋一侧的生物礁带, 一般以陡的角度向下倾斜, 有时迅速过渡到深海. 永兴岛东南礁坪的礁前斜坡坡度较缓($<10^{\circ}$), 而北或西北礁平的礁前斜坡坡度很陡($>60^{\circ}$)(图 2). 礁前是珊瑚礁上珊瑚生长相对聚集的地方, 因为这里波浪作用有限, 最适合大型珊瑚生长. 这个区域中珊瑚的类型和多样性是受光照和其他因素影响, 由于光照随深度减弱, 不同类型的珊瑚数量也随深度增加而减少.

3.4 珊瑚礁分带的变化

珊瑚礁受到许多不同因素的威胁, 包括养分增加、沉积作用、土地使用、疾病、海平面上升和热应力等. 气候变化和人类活动是珊瑚礁的最大威胁, 其可以使珊瑚礁分带发生变化, 随着气候变化和增加的热压力事件以及人类活动的增加, 浅水区的珊瑚特别危险, 因为它们已经在其可承受范围的边缘生活.

4 永兴岛东南珊瑚礁坪生物群落

永兴岛东南礁坪上的生物群落划分和分布见图 3. 群落的划分和命名同时考虑了优势种和群落所处的环境(Nakamori, 等, 1992).

4.1 底质砂群落

底质砂群落是最靠近海岸的一个群落, 以砂底质为特征, 在低潮时完全暴露出水面, 高潮时水体深度达 1.5 m, 通常水深在 70 cm 左右, 自海岸向海延伸约 100~150 m, 地貌平坦, 沉积物以松软的珊瑚砂为主, 间或有少量被风浪带来的珊瑚骨骼碎块. 生物相对稀少, 以底栖钻孔的蟹类和零星生长的藻类和海草为主, 偶尔见海葵. 从岸向海方向, 底栖生物逐渐变多、生态从单一到多样. 底栖生物主要有圆柱状仙掌藻(*Halimeda cylindracea*)、网地藻(*Dictyota* sp.) 和团扇藻(*Padina* sp.). 在离岸 20 m 内, 生物极其单调, 少量圆柱状仙掌藻和网地藻稀疏分布, 从离岸 30 m 左右开始见到卵叶盐草(*Halophila ovalis*)、海葵(anemones)和团扇藻出现, 团扇藻需要植根在硬底质上生长, 离岸 30 m 左右沉积的珊瑚骨骼碎块为团扇藻的生长提供了底质条件.

4.2 宏藻群落

底质以珊瑚骨骼碎块和珊瑚砂为特征, 分布在离岸 150~250 m 的区域内, 低潮时大部分也暴露于水面之上, 平均水深在 80 cm 左右. 生物以宏藻类为主, 见多种绿藻和褐藻, 如绿藻类的仙掌藻(*Halimeda chlorophyta*, *Halimeda discoidea decaisne*, *Halimeda cylindracea*), 褐藻类的网地藻和团扇藻. 海草生长区较为常见, 但分布不连续, 呈不归则片状区点缀在礁

坪上, 通常生长在地势较高的砂堆上, 海草形成的草甸被宏藻类生物生长区包围. 此外, 在砂质群落和宏藻群落的过渡区以圆柱状仙人掌藻为特征, 并伴有团扇藻发育. 圆柱状仙人掌藻大多生长在珊瑚沙丘之间的凹地, 而团扇藻则发育在珊瑚砂丘高部的珊瑚骨骼碎块上, 向海方向逐渐由圆柱状仙人掌藻过渡为仙人掌藻 *Halimeda tuna*. 卵叶盐草局部增多, 偶见海葵.

4.3 苍珊瑚群落

苍珊瑚(*Heliopora coerulea*), 是苍珊瑚目下唯一的一个珊瑚种, 也是四射珊瑚亚纲中唯一能长出大型骨骼的珊瑚. 苍珊瑚的骨骼特征是由霰石所构成, 与石珊瑚目相似, 该类珊瑚在西沙永兴岛东南礁坪的低洼区广泛发育, 在最低潮时这些低洼区仍有海水残留, 从珊瑚礁地理和地貌位置来看, 它们主要分布于外礁坪向海边缘, 水体深度 50~100 cm 左右, 生长状态为密集丛状, 有时呈丘状生长于低洼区的高部位, 通常沿礁坪上的浅潮道发育, 逐步把潮道填满. 该类珊瑚比较偏爱水体动荡且水能量较大的水体, 并且连续成片生长. 除苍珊瑚外, 也见有零星分布且个体较小的滨珊瑚. 卵叶盐草和其他海草(*Seagrass*)比较少见.

4.4 礁坪前缘突起带群落

礁缘突起带是由波浪作用形成的独特地形, 位于外礁坪向海一侧, 相当于潮间带“防波堤”, 对波浪的消减和能量的损耗起着相当的作用. 该带距离海岸 450~550 m, 通常宽 5~10 m, 并且经常在低潮时露出水面, 其顶面高出低潮面 0.5~1 m. 由于靠近礁坪前缘, 水体较浅, 水深在 60 cm 左右, 水动力强, 受水流的往复冲刷而沉积珊瑚骨骼碎块和断枝(图 7(a)), 夹杂有扁平的块状珊瑚骨骼. 由于受涌浪作用和水能量高的影响, 生物比较单调; 局部可见枝状鹿角珊瑚成片生长, 如鹿角珊瑚 *Acropora gemmifera*, 它们的形态呈圆形和表现出体重增大的变化. 此外, 小型的蜂巢珊瑚和扁脑珊瑚也有产出. 向岸方向可见零星的海葵, 海葵周围生长有极少量的褐藻和海草, 但大型藻类缺乏. 局部水流不畅的地方, 在珊瑚的断枝上生长有绒毛状的微生物, 向海方向, 偶见有橙黄滨珊瑚, 基本上是贴地生长. 在接近礁坪前缘的地方, 低矮的珊瑚藻开始出现, 分布较为稀疏, 橙黄滨珊瑚的个体逐渐粗壮起来, 可以见到少量个体和丛体均

很小的苍珊瑚, 而在外礁坪则生长的是大型丛状苍珊瑚, 这种珊瑚在礁坪不同位置的个体大小差异可能与礁坪不同分带的水体能量和营养有关.

4.5 礁脊鹿角珊瑚-滨珊瑚-蜂巢珊瑚-扁脑珊瑚群落

群落分布于礁坪前缘的礁脊和礁前, 这个带通常是生物礁的主体部分, 是珊瑚礁生物最丰富和珊瑚分异度最高区域, 也是生物礁发育的核心部位, 形成了高低起伏、陡缓交错、丘壑跌宕的水下生物礁地貌. 这个部位长年受中等至强波浪作用, 水体清澈, 氧气充足, 盐度适宜, 营养物质供应充分, 浮游生物丰富, 沉积物类型特殊(兼有原地和浅水来源的特点). 因此, 造礁珊瑚种类多且生态类型多样, 包括蜂巢珊瑚(*Favites* sp.), 扁脑珊瑚(*Platygyra* sp.), 滨珊瑚(*Porite* sp.), 合叶珊瑚(*Symphyllia* sp.), 菊花珊瑚(*Goniastrea* sp.), 刺孔珊瑚(*Echinopora* sp.), 苍珊瑚(*Heliopora* sp.)和各种鹿角珊瑚, 如浪花鹿角珊瑚(*Acropora cytherea*), 巨锥鹿角珊瑚(*Acropora monticulosa*), 壮实鹿角珊瑚(*Acropora robusta*)和细柱佳丽鹿角珊瑚(*Acropora pulchra*)等). 此外, 羽珊瑚(*Clavularia* sp.)和指形软珊瑚(*Sinularia* sp.)也很常见. 该群落位于为受波浪冲击最强的生境中, 珊瑚为了适应强的波浪冲击, 形成各种抗浪生态类型, 如群落中的鹿角珊瑚, 其生态类型以枝体壮实、丛体平展和低缓以及连片包覆或皮壳状的生长类型为特征; 有些鹿角珊瑚枝体变得粗短和厚实, 以此抵抗波浪的冲击, 例如礁脊部分常见的分枝异常粗壮的佳丽鹿角珊瑚(*Acropora pulchra*)就是这类珊瑚的典型代表. 此外, 由主枝和小枝形成巨大和扁平的掌状或荷叶状生长形态的是浪花鹿角珊瑚(*Acropora cytherea*), 大型的浪花鹿角珊瑚丛体表面似平板或台面. 还有一些鹿角珊瑚呈皮壳状生长, 如包覆在珊瑚碎块和骨骼颗粒上生长的杯形鹿角珊瑚 *Acropora crateriformis*. 球块状的复体珊瑚也为抗浪类型中的典型生态类型, 如标准蜂巢珊瑚的珊瑚骨骼融合成块状, 团块滨珊瑚大都贴着硬底生长, 而普哥滨珊瑚和橙黄滨珊瑚则大多包裹着破碎的珊瑚碎片生长, 起到固定珊瑚骨骼并抗波浪冲击的作用. 这个群落藻类也很丰富, 常见的有珊瑚藻、仙人掌藻和马尾藻.

在线截取断面 V 和 VI 进入礁脊部分选取的 5 m × 5 m 的样方统计区内 (离岸的距离大约 515 m, 水深 2.5~3.5 m, 地貌为向广海方向倾斜 2~3 度的缓坡, 底

质为礁格架岩硬底), 用 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方连续照相和记录珊瑚种、属、丛体大小和分布, 然后在室内用 Photoshop 处理后统计出每个样方中珊瑚种属的产出、大小和分布, 用 AutoCad 结合 Illustrator 软件进行 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 统计区内珊瑚种属的平面分布. 图 4 的分析结果表明样方统计区内产出珊瑚 8 属 16 种, 以鹿角珊瑚属为主(图 5), 伴生有滨珊瑚属、蔷薇珊瑚

属、扁脑珊瑚属、杯型珊瑚属、刺孔珊瑚属, 八放珊瑚的苍珊瑚属和羽珊瑚属(*Clavularia* sp.), 鹿角珊瑚种群中又以浪花鹿角珊瑚(*Acropora cytherea*)占绝对优势(图 5). 覆盖率的统计表明, 浪花鹿角珊瑚(*Acropora cytherea*)的覆盖率达 28%以上, 是绝对的优势种. 佳丽鹿角珊瑚(*Acropora pulchra*)和团块滨珊瑚(*Porites lobata*)的覆盖率次之, 表明其在礁脊的珊瑚

图 4 测线V和测线VI礁脊部分珊瑚种、属样方统计平面分布图

图 5 测线VI和测线V礁脊部分珊瑚物种丰度分级图

群落中也占据着重要的位置(图 4).

4.6 礁塘珊瑚群落

从外礁坪靠近礁脊部位开始, 主要在礁脊区发育有众多礁塘, 塘壁上通常长满茂盛的珊瑚丛, 珊瑚有一定的分异度, 迎浪一侧塘壁以低矮的抗浪生态类型为主, 其他波浪作用弱的塘壁则以枝丛状生态类型为主. 群落中的特征生物是分枝状鹿角珊瑚(*Acropora formosa*), 伴生有苍珊瑚、杯形珊瑚、笙珊瑚、蔷薇珊瑚等. 分枝细而长、枝顶尖锥状的鹿角珊瑚形态非常脆弱, 抗风浪性极差, 适宜生长于静水环境中, 而礁塘虽处于强风浪作用区, 其低洼的地形为这种珊瑚创造了一个避风的港湾. 完全封闭的礁塘下部水流不畅, 分枝状鹿角珊瑚的枝体上长满绒毛状的蓝细菌和藻类. 有些礁塘则以丛生的苍珊瑚为主, 苍珊瑚密集生长形成陡峭而坚硬的塘壁, 在塘底的硬底上, 偶见单丛的苍珊瑚生长.

5 珊瑚礁碳酸盐沉积分带

珊瑚礁中有超过 90% 的沉积物来自礁本身, 而远离陆地的珊瑚礁岛几乎完全由珊瑚骨架和内源性沉积物(endogenous sediments)构成, 以生物成因的碳酸盐沉积为主. 永兴岛东南礁坪的沉积物以礁相碳酸盐沉积为特征, 几乎没有陆源碎屑组分, 碳酸盐沉积物主要有三种类型: 珊瑚骨架沉积、珊瑚碎块沉积和生物碎屑沉积. 珊瑚骨骼和骨架沉积的分布范围见图 3, 主要由鹿角珊瑚、滨珊瑚、蜂巢珊瑚和扁脑珊瑚为主的原地造礁的珊瑚组成, 其中苍珊瑚也做出一定的贡献, 骨架间充填着各种珊瑚和贝壳碎屑. 珊瑚碎块沉积主要为激浪作用打碎的珊瑚骨架碎块搬运至礁坪和礁坪前缘的杂乱堆积, 各种珊瑚碎块和断枝、贝壳以及生物碎屑在海水胶结作用下处于固结或半固结状态. 生物碎屑沉积是由白色砂级的珊瑚、贝壳和其他生物碎屑组成.

根据沉积物类型、水动力条件、水体深度和生态群落分带, 将永兴岛东南礁坪划分为四个沉积相带(图 3): (1) 礁前斜坡; (2) 礁脊和礁前; (3) 礁坪; (4) 海岸带. 各相带内可以根据不同特征划分出若干亚带.

礁前斜坡是自礁脊低潮面至水深 25~30 m 的缓坡区域, 坡度为 $1.3^{\circ}\sim 2.4^{\circ}$, 处于迎风地带, 虽然处在

强波浪作用区, 但由于水体较深, 活体珊瑚很少, 也没有形成珊瑚骨架堆积, 主要沉积物是波浪从礁脊带来的礁块和碎屑沉积, 通常堆积在礁前的坡角处(图 6(d)).

礁脊和礁前是珊瑚礁现生发育的主体部位, 以大量活体珊瑚生长在死亡的珊瑚骨架上为特征(图 6(a)), 由于光照充足、波浪作用频繁、营养物质供应充分, 造礁珊瑚种类多且生态类型多样(图 6(b),(c)). 沉积物以珊瑚骨架堆积和充填骨架孔隙的生物碎屑为特征. 本带所产生的礁源碎屑受波浪、潮流和洋流的作用, 分别向外海、向岸、或沿礁缘向湾内搬运和堆积, 是永兴岛珊瑚礁沉积体系的主要物源区. 珊瑚骨架间由于波浪的反复淘洗, 生物碎屑较少, 该区域局部地段活体造礁珊瑚覆盖率可以达到 70%~80%. 礁脊发育很多礁塘, 直径一般都在 5~10 m, 深度一般在 1~3 m 之间, 有些深度可达 5 m 以上.

礁坪位于低潮面附近, 表面平坦, 略有起伏, 低潮时大部分露出于水面. 永兴岛东南礁坪的宽度一般为 450~550 m, 礁坪碳酸盐沉积总的特征为自岸向海方向沉积物由细变粗, 从以细小的生物砂沉积为主到以粗大的珊瑚断枝和珊瑚碎块沉积为主. 内礁坪主要以生物碎屑砂沉积为主, 而外礁坪则以生物碎屑砂和珊瑚及其他生物骨骼碎块混合沉积为主. 礁坪的沉积分带包括: (1) 外礁坪与礁脊之间生物碎屑、骨骼碎块和骨架沉积带, 位于外礁坪至礁脊之间宽约 20~30 m 的带状沉积区域, 它的内侧为一较窄突起沉积带(图 7(a)), 是由波浪作用搬运礁脊和礁前的珊瑚骨骼和生物碎块堆积至此而形成的独特微隆起沉积地貌, 低潮时可完全出露, 其顶面高出低潮面 0.5~1.0 m, 它的向海一侧为礁脊的骨架沉积带, 为珊瑚丛林区域, 向岸一侧通常由原地珊瑚骨架、珊瑚碎块和断枝以及少量生物碎屑充填物组成. 沉积特征表现为向岸方向个体大的珊瑚碎块和断枝减少, 生物碎屑充填增多, 向海一侧以卵圆形、扁圆形的块状珊瑚碎块为主. (2) 外礁坪骨骼碎块和生物碎屑混合沉积带, 位于破浪带内侧, 低潮时高出水面, 主要由各种珊瑚骨骼碎块和生物碎屑砂组成(图 7(b)), 物源来自于礁坪前缘(礁脊), 珊瑚骨骼碎块占总面积的 80%~95%, 其表面覆盖生物碎屑砂, 由于海水胶结和藻类的粘结作用, 堆积的珊瑚骨骼碎块发生有一定程度的固结和早期成岩作用. 珊瑚碎块以丛状珊瑚的断枝为主, 其中鹿角珊瑚断枝约占 40%~50%,

图6 永兴岛东南礁坪沉积分带

(a) 礁脊的复体块状造礁珊瑚生长在死亡的珊瑚骨骼上; (b) 礁脊大片低矮丛状鹿角珊瑚; (c) 礁脊区巨大的掌状或荷叶状生长形态的是浪花鹿角珊瑚和刺孔珊瑚(样方网格间距为 10 cm); (d) 礁前的礁块、骨骼碎块和碎屑沉积

块状复体珊瑚(如滨珊瑚、蜂巢珊瑚和石芝珊瑚)约占 30%~40%，贝壳和其他生物约占 10%。该沉积带生物种类单调，活珊瑚罕见，向岸一侧低洼处(水深 30~40 cm)中偶见蜂巢珊瑚和滨珊瑚，砾块中有红色的笙珊瑚个体。在外礁坪珊瑚碎块和断枝形成的丘状硬底上，发育大片抗浪的苍珊瑚，这些苍珊瑚死亡后原地堆积形成苍珊瑚骨骼沉积带。外礁坪内侧珊瑚碎屑砂沉积为主的地方卵叶盐草生长比较茂盛，而外礁坪外侧珊瑚碎块沉积为主的地方珊瑚种类和其他生物类型较为多样。(3) 内礁坪生物碎屑砂沉积带(图 7(c))，这是内礁坪的沿岸部分，生物碎屑占 50%以上，宽 200~300 m，分选性向岸变好，砂屑组分以珊瑚碎屑为主，其次为有孔虫、贝壳生物屑和藻屑，本相带由海向岸方向，发育有宏藻群落和底质砂群落，生物类型由多到少，由复杂到单一。

海岸沉积带，波浪将礁坪上珊瑚和其他生物碎屑砂搬运到潮间带上堆积成砂质海滩，不长植物，西沙群岛有些灰沙岛上受风暴频繁影响的海滩常形成珊瑚砂和砾石堤堆积。永兴岛东南礁坪的海滩宽 20~30 m，野外观察和室内分析表明，不同部位的沉

积物有差异，海滩较粗的砂和砾一般夹带各种垃圾呈带状与滨线平行分布，砾块由鹿角珊瑚断枝、珊瑚碎块、枝状海绵、贝壳和鱼骨等多种成分组成，混杂有陆地植物和生活垃圾。海滩沉积以中砂为主，而高潮线上各类粗砂和砾含量较高。

6 礁坪前缘水下地貌和微生物碳酸盐沉积

永兴岛东南礁坪的外缘和礁脊部分发育了许多大小和规模不等、深浅不一的礁塘，这是永兴岛东南礁坪珊瑚礁发育的独特和重要特征之一，礁塘大多为不规则状，礁塘深度为 1~3 m，从礁坪前缘向礁前斜坡处礁塘的深度加大，靠近礁前斜坡处可达 5 m。礁塘的底通常被松软珊瑚砂覆盖(图 8(a), (b))，偶尔有小型的补丁礁块出现。礁塘的塘壁向海方向相对较缓，而向陆方向则比较陡峭，而平行岸线或礁坪前缘走向方向也以缓壁为主，礁塘的长轴通常与岸线或礁坪前缘走向垂直。礁塘之间有时有水道相通，有些则完全封闭，这些礁塘的形成是受风浪方向和水动力强弱影响，对塑造礁脊(礁核)微观地貌和促进各

图 7 永兴岛东南礁坪沉积分带

(a) 外礁坪与礁脊之间珊瑚骨骼和生物碎块堆积形成的突起沉积带; (b) 外礁坪骨骼碎块和生物碎屑混合沉积带; (c) 内礁坪生物碎屑砂沉积带, 少量珊瑚上骨骼生长有团扇藻, 生物碎屑砂上发育卵叶盐草和其他海草

种珊瑚成礁具有重要作用. 珊瑚主要生长在礁塘壁上, 最常见的是枝状鹿角珊瑚, 复体块状的珊瑚极少, 代表了一种相对安静、封闭、水流循环不畅的生境. 鹿角珊瑚的枝体上长满绒毛状的蓝绿藻和蓝细菌. 这些礁塘在永兴岛礁盘的其他礁坪前缘都没有发育, 如在永兴岛北和西北靠近石岛的礁坪前缘和礁脊中则发育突起脊-潮沟系统(图 8(c), (d)), 这些突起脊和潮沟从礁坪前缘开始发育, 一直可延伸到礁前较深水沉积中, 基本都与礁坪前缘或岸线的走向垂直, 槽沟宽 1~2 m, 沟壁陡立, 潮沟断面呈 U 型或 V 型, 切割深度一般小于 1 m. 潮沟往礁脊和礁前延伸时可以分岔, 潮沟代表了海浪冲刷礁坪的作用方向, 槽沟内沉积物很少, 主要为磨圆较好的珊瑚礁碎块, 几乎没

有生物碎屑砂堆积, 潮沟壁上也没有活珊瑚生长.

微生物碳酸盐沉积是礁坪上海水富营养化或海水循环相对不畅条件下由微生物发育诱发的碳酸盐矿物沉淀, 永兴岛东南礁坪的礁塘中丛状鹿角珊瑚枝体上都生长着绒毛状的蓝绿藻和蓝细菌(*Lyngbya majuscula*), 初步观察这些珊瑚都已经死亡, 一些绒毛状的微生物沉积也围绕着死亡的 *Acropora teres* 的断枝和完整的珊瑚枝发育(图 9(a)), 绒毛状的蓝绿藻和微生物以礁塘坡壁和礁坪前缘沉积物突起带阻隔的低水能和循环不畅的环境最为发育.

礁坪上的微生物以蓝细菌为主, 大多呈席状生长在块状复体珊瑚之上, 生长形式表现为长绒毛状, 在死亡的滨珊瑚由波浪限制的平的顶端, 绒毛状的

图8 西沙永兴岛珊瑚礁坪前缘(礁脊)发育的礁塘(东南礁坪前缘(礁脊)((a), (b)) and 潮沟(北和西北礁坪前缘(礁脊)中发育的潮沟((c), (d))

均为水下摄影

微生物(可能多为 *Lyngbya majuscula*)呈席状覆盖在灰白的珊瑚骨骼上(图 9(b)). 此外, 在死亡的巨锥鹿角珊瑚表面, 被波浪侵蚀掉锥状丛体后形成的平面上, 绒毛状的微生物也呈席状生长和分布(图 9(c)), 这些绒毛状并呈席状生长的微生物是珊瑚礁灰岩中微生物碳酸盐成分的主要来源, 通常发育在内礁坪或礁坪前缘(礁脊)的礁塘中, 这两种生境通常具有相对封闭、水流不畅、藻类广泛发育的特征. 礁塘中绒毛状微生物通常生长在死亡的枝状珊瑚 *Acropora* sp.上, 而礁坪中的绒毛状微生物则多发育在块状复体珊瑚的顶端. 藻类的普遍发育指示了一种富营养海水环境, 礁坪上珊瑚表面发育的微生物也指示海水富营养和水质恶化的情况.

7 讨论

7.1 永兴岛珊瑚礁坪群落动态变化的影响因素

永兴岛及周围岛屿的珊瑚礁群落种属趋于单调, 珊瑚礁正趋于衰退和水下荒漠化. 人类活动和自然压力对珊瑚群落的影响表现在群落的分布、群落属种

结构和珊瑚群落的动态变化, 礁坪的海底地形、水深、波浪和水流强度、光线、海水温度和悬浮沉积物等自然因素主要影响珊瑚礁环境中造礁珊瑚群落水平和垂直分带. 内礁坪由于近岸而受到各种建筑垃圾和生活垃圾排放的影响, 永兴岛北侧的人工堆积成的岛屿增加部分以及永兴岛和石岛之间礁坪上的人工连接堤路的建成都直接影响到礁坪水流的循环和沉积物的分布和沉积. 建筑垃圾和人类活动废弃物进入礁坪环境会导致水体获得的光能急剧减少, 同时, 海水的浑浊度也会变高, 这些变化不仅使得礁坪, 特别是内礁坪海水的水质发生变化, 同时也影响到礁坪中水流的循环, 对珊瑚进行光合作用是非常不利的, 这将增加珊瑚患病和遭遇生物侵蚀的机会. 内礁坪上的活珊瑚已经急剧减少, 几乎都为生物骨骼砂和珊瑚碎块覆盖. 礁坪上水流循环好、水质清洁的地方有成片的海草生长, 形成局部分布的水下草甸; 而水流循环较差, 水质不好的地方则生长各种蓝藻和褐藻, 珊瑚群落主要分布在礁坪前缘(礁脊和礁前环境); 相比较而言, 永兴岛北和西北连接石岛的礁坪因建成的堤路、在建的新港口和各种生活排泄物

图 9 永兴岛礁坪和礁塘中的微生物和藻类相关的碳酸盐沉积

(a) 礁塘中坡壁上鹿角珊瑚枝体上的绒毛状微生物; (b) 礁坪前缘滨珊瑚顶上的微生物席(箭头所指); (c) 礁坪上巨锥鹿角珊瑚面上的微生物席(虚线圈内, 箭头所指)

的增加而使得水质严重恶化、海水混浊度增加、有机悬浮物弥漫水体, 活珊瑚几乎绝迹, 海草也几近于无, 藻类和微生物遍布礁坪, 这里的礁脊和礁前的活珊瑚也呈零星分布, 以刺孔珊瑚和软珊瑚为主, 但覆盖率不高, 大都生长在潮沟之间的突起脊上, 在水深 3~7 m 约 150 m 的范围内活珊瑚几近于无, 到水深 10 m 左右的礁前, 海底荒漠一片, 未见活的珊瑚及其他底栖生物。总体来看, 永兴岛东南礁坪以及北和西北连接石岛的礁坪之间在珊瑚礁群落发育、礁坪生物覆盖率、礁坪前缘珊瑚礁发育及水下地貌、微生物和藻类的发育和分布都有明显不同, 代表了人为和

自然压力的不同作用效应所产生的结果。

7.2 永兴岛珊瑚礁坪前缘发育特征和影响因素

珊瑚礁从海底生长到海平面或稍低于海平面的位置, 这里通常称为礁前(fore-reef or reef front)环境, 从礁前向海方向延伸的斜坡(礁前斜坡)即可以是平缓的, 也可以是陡立的, 这通常由礁前所面对的风向和海流来决定, 有时候礁前斜坡会形成一种直落式的垂直陡壁, 然而, 礁前一般都形成称之为突起脊和槽沟系统的指状发育和延伸形态, 以分散和减弱波浪能量和避免其对生物礁和居礁生物的破坏。槽沟

形似砂充填的口袋,使得珊瑚表面的沉积物可以向下疏导,这里为许多钻孔生物提供了栖息地。礁脊是生物礁地貌的最高点,从礁脊更向陆地的方向,一般形成礁坪或礁后,该区域具有高度的可变性,礁坪的底质通常为岩石、砂、珊瑚卵石或这些沉积的混合物,海草通常生长在礁坪环境。

永兴岛的东南礁坪前缘向海方向延伸的斜坡(礁前斜坡)是平缓的,而北和西北连接石岛的礁坪前缘向海方向延伸的斜坡是相对陡立的,东南礁坪的礁前水下地貌特征以礁坪前缘不连续的潮道和礁前各种形状和不同水深的礁塘为特征,礁塘和突起珊瑚礁可以平缓向海延伸数百米,水深 0~5 m 之间;而北和西北礁坪的外缘则形成典型的突起脊-槽沟(spur-and-groove)水下地貌,这种突起脊-槽沟系统一般发育在具有比较陡立的礁前斜坡的礁坪前缘,槽沟可以从外礁坪延伸到礁前斜坡以下,但突起脊则主要发育在礁脊向海一侧和礁前的位置,由造礁珊瑚生长堆积而成,槽沟底部通常铺满珊瑚碎石或碳酸盐砂,突起脊在增长时长满活珊瑚,当停止增长时,则成为相关底栖生物的居住场所。突起脊和槽沟的发育延伸方向一般垂直于海岸或礁前陡坡的走向,形成于持续波浪作用的环境下,主要由涌浪和信风波的侵蚀作用塑就(Cloud, 1952; Sheppard, 1982),波浪的方向、能量以及水动力作用方式是影响突起脊-槽沟系统形成的主要决定因素(Gischler, 2010; Rogers, 等, 2012)。永兴岛北部和西北部礁缘突起脊-槽沟系统明显不同于南部(东南部)礁缘的礁脊和礁塘系统,这可能与永兴台礁不同方向的礁前斜坡坡度、迎风和背风位置、季风的影响以及珊瑚礁生长的基底特征有关。

7.3 蓝细菌和藻类对永兴岛珊瑚礁生态系的影响

全球珊瑚礁最令人焦虑的问题是宏藻类和底栖蓝细菌在珊瑚礁区大量繁盛。蓝细菌可以生长在珊瑚礁生态系统的不同位置上(Schneider, 1999),可以形成生物礁的一部分(如微生物石),可以生长在珊瑚礁内(endoliths)或附生在珊瑚礁上(epiphytes),可以作为海绵的共生生物,或以微生物席形式覆盖在软质海底上,蓝细菌也大量生长在珊瑚礁表面的凹塘中以及水柱中。蓝细菌在珊瑚礁中的作用主要表现在:(1) 建造和侵蚀生物礁,(2) 重要的初级生产者,(3) 异养生物有机源,(4) 通过固氮作用为珊瑚礁生

态系统提供氮(Karl 等, 2002)。一些蓝细菌还能与珊瑚甚至一些无脊椎动物共生(Richardso 等, 2003),最常见的宿主生物是海绵和海鞘。蓝细菌在氮、磷丰富的水体中生长旺盛,可作为水体富营养化的指示生物(Whitton 等, 2000)。此外,蓝细菌也能与活珊瑚组织上的其他微生物一起形成病原微生物菌群(群落),导致珊瑚组织溶解、珊瑚死亡以及相当程度的珊瑚礁衰减。蓝细菌对珊瑚礁的生长具有许多有害影响,底栖蓝细菌在珊瑚礁上正变得越来越丰富,并产生含氮次生代谢产物来影响草食动物的进食(Ritson-Williams 等, 2005)。

随着永兴岛的开发和建设,岛上的人口不断增加,10 多年前还以军人作为主要人口的岛屿,现在除了各路建设工人、渔民、三沙市政府的管理人员以及银行和医院工作人员外,还有不断增加的旅游人员,人口的增加产生了大量垃圾和生活污水。由于永兴岛是一个质地松散的新灰沙岛,土质孔隙度高,渗透性强,无地表径流,雨水渗入地下后与海水相通,这样不管生活垃圾是露天堆放还是填埋,经雨水淋滤出的有机物、重金属和病原微生物等都会进入海水中。此外,生活污水和三级化处理后的粪便都直接进入地下,污水和粪便中的大量有机物、氮和磷会随雨水渗入地下然后进入海水中,使岛屿周围的水质和珊瑚礁生态系统的环境恶化(李颖虹等, 2004a),并造成礁坪的海水富营养化。

人类活动排放的二氧化碳已经引起海洋 pH 降低、温度升高和珊瑚礁区海水的富营养化。海水的富营养化造成了蓝细菌的繁盛和爆发,比如波罗的海由于海水中磷的增加而使得海水富营养化,造成蓝细菌的繁盛(Bianchi 等, 2000),在澳洲大堡礁的昆士兰州沿岸,由地表径流带入水中的磷、铁和有机碳等营养物质刺激了蓝细菌 *Lyngbya majuscula* 的生产力(Albert 等, 2005)。张瑜斌等综述了海水富营养化对海洋细菌影响的研究进展,这些研究表明细菌数量或生物量随着海水营养程度的递增而增加(张瑜斌等, 2012)。珊瑚礁生态系统中,由于海水的富营养化,各种底栖和浮游的蓝细菌大量生长,这些蓝细菌不仅改变了水质和珊瑚礁生态系的结构,而且已经对热带珊瑚礁造成了毁灭性的打击(Bell, 1992; Charpy 等, 2010)。据近年对西沙珊瑚礁的调查和监测,礁坪的珊瑚生物已大量死亡,与之相伴的是蓝细菌微生物在礁坪区的广泛发育,蓝细菌会随着珊瑚礁的衰减

而大量繁殖扩散, 并以很大的比例覆盖在活珊瑚基座上, 活体造礁珊瑚群落局限于礁坪前缘的礁脊和礁前位置. 与微生物繁盛和活动有关的珊瑚的黑色条纹病(Black band disease)是珊瑚许多疾病的一种, 其在观测到的珊瑚礁衰减过程中扮演了重要的角色, 在永兴岛北或西北连接石岛的礁坪前缘已经发现这种微生物引发的珊瑚疾病的实例(杨红强等 2014). 由于蓝细菌的吸食控制, 成年珊瑚种群的繁衍会被减缓, 从而降低珊瑚覆盖率和限制珊瑚群落恢复, 蓝细菌席也对石珊瑚起到毒害的作用, 并且能够杀死活珊瑚组织(Titlyanov 等, 2007).

7.4 人类活动的增加正在加剧影响永兴岛礁坪的珊瑚生物和珊瑚礁发育

过去的一些研究工作已经涉及到永兴岛的珊瑚礁及相关的珊瑚生态和群落(邹仁林, 1978; 李颖虹等, 2004b; 黄晖等, 2006; 施祺等, 2011; 黄晖等, 2011; Wu 等, 2011), 多年的调查和研究表明石岛西侧的造礁珊瑚在 2007 年以前一直处于良好的状态, 邹仁林在上世纪 70 年代调查中得出永兴岛造礁珊瑚的覆盖率 80%以上, 处于非常好的自然生长状态(邹仁林, 1978), 王国忠在 20 世纪 80 年代的调查中也得出永兴岛的珊瑚覆盖率在 90%以上(王国忠, 2001). 进入本世纪后, 黄晖等 2002 年的调查认为永兴岛造礁珊瑚的覆盖率仍然在 90%以上(黄晖等, 2006); 此外, 从 2003 年到 2007 年海南省海洋和渔业局的年度调查也得出永兴岛活的造礁珊瑚覆盖虽有下降, 但仍保持在 76%和 83%之间, 处在一个比较稳定的状态, 这些调查都表明在 2007 年以前永兴岛的珊瑚处于比较健康或者健康的状态. 然而, 施祺等在 2008 年 7 月份对永兴岛的调查发现珊瑚覆盖率只有 16.3%(施祺等, 2011), 在 2008 和 2009 年海南省海洋和渔业局的两次年度调查都表明永兴岛的珊瑚都处于一种很低的覆盖率(11.2%), 由此看出自 2008 年以来永兴岛的石珊瑚覆盖率一直处于下降状态.

人类活动影响和自然压力(比如全球气候变化)是造成珊瑚礁发育和珊瑚生物衰减的两个主要影响因素(Nyström 等, 2000; Hughes 等, 2003; Buddemeier 等, 2004; Carpenter 等, 2008; Knowlton 等, 2008), 人为的因素主要包括持续的人口增加、繁忙的海上运输或舰船行驶及过度的渔业捕捞, 永兴岛和石岛上人口的增长、更多的资源需求和人类活动的增多, 导

致废弃物、垃圾和污染物的增加, 而这些污染物经过简单处理后直接排入海水中(李颖虹等, 2004b; Zhou 等, 2007). 随着石岛和其附近永兴岛的发展, 大量的基础设施相继被建; 永兴岛西南有两个繁忙的港口, 它们分别建于 20 世纪的 70 年代和 90 年代, 另外一个港口正在建设中; 永兴岛东北石岛西侧是一个繁忙的航道, 许多船只经常对珊瑚礁的上方抛锚等待进入港口, 大的船只对珊瑚造成直接的破坏, 小的船只在礁坪上穿梭对珊瑚礁有长期的影响. 此外, 小的渔船码头、港口和两岛之间的堤道的建设不仅影响水流而且影响海水中沉积物的重新分布. 近年来随着西沙旅游的兴起, 大量的游客登岛和在岛屿周边活动的增加不仅直接干扰珊瑚礁的自然生态环境, 同时也间接地影响和改变珊瑚礁赖以生存的各种环境因素. 过度渔业是南海最为普遍的问题, 南海有超过 75%的珊瑚礁正受到过度渔业的威胁(Goldberg 等, 2004), 除了在珊瑚礁中毒鱼这种明显破坏珊瑚礁生态系统的渔业方式外, 日益增长和大量地捕捉珊瑚礁的共生生物也是对珊瑚礁最致命的破坏.

8 结论

(1) 永兴岛东南礁坪可以分出礁坪(礁后)、礁脊或礁核、向海的礁前和礁前斜坡, 礁坪可分为内礁坪、外礁坪和礁坪前缘, 活珊瑚主要生长在礁坪前缘的礁脊和礁前部分, 与其他岛礁不同的是, 礁坪前缘(礁脊和礁前)发育有各种形态不一、深浅不同的礁塘.

(2) 永兴岛东南礁坪的生物群落从内礁坪向礁前斜坡主要有: 1) 底质砂群落; 2) 宏藻群落; 3) 苍珊瑚群落; 4) 礁坪前缘突起带群落; 5) 礁脊鹿角珊瑚-滨珊瑚-蜂巢珊瑚-扁脑珊瑚群落; 和 6) 礁塘珊瑚群落. 礁脊以鹿角珊瑚属为主, 伴生有滨珊瑚属、蔷薇珊瑚属、扁脑珊瑚属、杯型珊瑚属、刺孔珊瑚属, 八放珊瑚的苍珊瑚属和羽珊瑚属; 覆盖率的统计表明, 浪花鹿角珊瑚(*Acropora cytherea*)的覆盖率达 28%以上, 是绝对的优势种, 并且以抗浪的生态类型为主.

(3) 根据沉积物类型、水动力条件、水体深度和生态群落分带, 将永兴岛东南礁坪划分为四个沉积相带: 礁前和礁前斜坡、礁脊、礁坪和海岸带; 沉积物以礁相碳酸盐沉积为特征, 可分为三种类型: 珊瑚骨架沉积、珊瑚碎块沉积和生物碎屑沉积, 珊瑚骨架沉积是由鹿角珊瑚、滨珊瑚、蜂巢珊瑚和扁脑珊瑚

为主的原地造礁的珊瑚为骨架, 其中苍珊瑚也做出一定的贡献, 骨架间充填着各种珊瑚和贝壳碎屑; 珊瑚碎块沉积主要为激浪作用打碎的珊瑚骨架碎块搬运至礁坪和礁坪前缘的杂乱堆积; 生物碎屑沉积是由白色砂级的珊瑚、贝壳和其他生物碎屑组成。

(4) 礁塘的形成是受风浪方向和水动力强弱影响, 对塑造礁脊(礁核)微观地貌和促进各种珊瑚成礁具有重要作用, 珊瑚主要生长在礁塘壁上, 最常见的是枝状鹿角珊瑚, 复体块状的珊瑚极少, 代表了一种相对安静、封闭、水流循环不畅的生境, 鹿角珊瑚的枝体上长满绒毛状的蓝绿藻和蓝细菌, 而礁坪上的微生物以蓝细菌为主, 大多呈席状生长在块状复体

珊瑚之上, 生长形式表现为长绒毛状。

(5) 永兴岛礁盘北部和西北部礁坪前缘以发育突起脊-槽沟系统为特征, 而南部(东南部)礁缘则发育突起的礁脊和低洼的礁塘为特征, 这种礁盘不同方向上礁脊和礁前发育特征的差异可能与永兴岛礁盘不同方向的礁前斜坡坡度、迎风和背风位置、季风的影响以及珊瑚礁生长的基底特征有关。

(6) 人类活动的增加正在加剧影响永兴岛礁坪的珊瑚生物和珊瑚礁发育, 不管是礁坪珊瑚群落动态的变化, 还是礁坪蓝绿藻和微生物的繁盛, 抑或整个西沙群岛珊瑚生物的急剧衰减都有人类活动产生的各种影响的作用。

致谢 中国科学院南海海洋研究所西沙海洋环境观测和研究综合实验站和中国科学院南海海洋研究所海南热带海洋生物实验站提供野外考察各种支持, 审稿人对本文提出的建设性意见, 作者一并在表示衷心感谢。

参考文献

- 陈史坚, 钟晋梁. 1989. 南海诸岛志略. 海口: 海南人民出版社. 1-274
- 黄晖, 练健生, 黄小平, 等. 2006. 用珊瑚覆盖率作为干扰指标——永兴岛珊瑚生物多样性研究. 科学通报, 51: 108-113
- 黄晖, 尤丰, 练健生, 等. 2011. 西沙群岛海域造礁珊瑚物种多样性与分布特点. 生物多样性, 19: 710-715
- 李颖虹, 黄小平, 岳维忠. 2004a. 西沙永兴岛环境质量状况及管理对策. 海洋环境科学, 23: 50-53
- 李颖虹, 黄小平, 岳维忠, 等. 2004b. 西沙永兴岛珊瑚礁与礁坪生物生态学研究. 海洋与湖沼, 35: 176-182
- 施祺, 严宏强, 张会领, 等. 2011. 西沙群岛永兴岛礁坡珊瑚覆盖率的空间变化. 热带海洋学报, 2: 10-17
- 王国忠. 2001. 南海珊瑚礁区沉积学. 北京: 海洋出版社. 1-313
- 杨红强, 沈建伟, 付飞雪, 等. 2014. 黑带病可能导致了永兴岛北部礁坪珊瑚的衰退. 中国科学: 地球科学. 待出版
- 张瑜斌, 章洁香, 孙省利. 2012. 海水富营养化对海洋细菌影响的研究进展. 生态学报, 32: 3225-3232
- 赵焕庭, 宋景朝, 余克服. 1996. 西沙群岛永兴岛和石岛的自然与开发. 海洋通报, 1: 55-65
- 邹仁林. 1978. 西沙群岛珊瑚类的研究. 我国西沙, 中沙群岛海域海洋生物调查研究报告集. 北京: 科学出版社. 85-132
- Albert S, Neil J M O, Udy J W, et al. 2005. Blooms of the cyanobacterium *Lyngbya majuscula* in coastal Queensland, Australia: Disparate sites, common factors. Marine Poll Bull, 51: 428-437
- Ammar M S A, Mahmoud M A. 2006. Effect of physic-chemical factors and human impacts on coral distribution at Tobiakebir and Sharmelloly, Red Sea-Egypt. Egyptian J Aquatic Res, 32: 184-197
- Aronson R B, Precht W F. Stasis, biological disturbance, and community structure of a Holocene coral reef. Paleobiology, 1997, 23: 326-346
- Bell P R F. 1992. Eutrophication and coral reefs—Some examples in the Great Barrier Reef Lagoon. Water Res, 26: 3-568
- Bianchi T S, Engelhaupt E, Westman P, et al. 2000. Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea: Natural or human-induced? Limnol Oceanogr, 45: 716-726
- Blanchon P. 2011. Geomorphic Zonation of Coral Reefs. In: Hopley D, ed. Encyclopedia of Modern Coral Reefs: Structure, Form and Process. Dordrecht: Springer-Verlag. 469-486
- Buddemeier R W. 1993. Corals, climate and conservation. Proc 7th Int Coral Reef Symp Guam, 1: 1-10
- Buddemeier R W, Kleypas J A, Aronson R B. 2004. Coral reefs and global climate change. Potential contribution of climate change to stresses on coral reef ecosystems. Report Prepared for the Pew Center on Global Climate Change, Arlington. 1-44
- Carpenter K E, Arbar M, Aeby G, et al. 2008. One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. Science, 321: 560-563
- Chappell J. 1983. Sea level changes and coral reef growth. In: Barnes D J, ed, Perspectives on Coral Reefs. Townsville: Australian Institute of Marine Science. 38-55

- Charpy L, Palinska K A, Casareto B, et al. 2010. Dinitrogen-fixing cyanobacteria in microbial mats of two shallow coral reef ecosystems. *Microb Ecol*, 59: 174–186
- Cloud P E. 1952. Preliminary report on geology and marine environments of Onotoa Atoll, Gilbert Islands. *Atoll Res Bull*, 12: 1–73
- Crabbe M J C. 2007. Climate change and coral reefs. *Biologist*, 54: 24–27
- Gischler E. 2010. Indo-Pacific and Atlantic spurs and grooves revisited: The possible effects of different Holocene sea-level history, exposure, and reef accretion rate in the shallow fore reef. *Facies*, 56: 173–177
- Goldberg J, Wilkinso C. 2004. Global threats to coral reefs: Coral bleaching, global climate change, disease, predator plagues, and invasive species. In: Wilkinson C, ed. *Status of Coral Reefs of the World*. Townsville: Australian Institute of Marine Science. 67–92
- Goreau T F. 1959. The ecology of Jamaican coral reefs I. Species composition and Zonation. *Ecology*, 40: 67–90
- Hallock P, Bames K, Fisher E M. 2004. From satellites to molecules: A multiscale approach to environmental monitoring and risk assessment of coral reefs. *J Environ Micropal Microbiol Meiobenthol*, 1: 11–39
- Hoegh-Guldberg O. 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar Freshw Res*, 50: 839–866
- Hughes T P, Baird A H, Bellwood D R, et al. 2003. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 301: 929–933
- Iglesias-Prieto R, Beltrán V H, LaJeunesse T C, et al. 2004. Different algal symbionts explain the vertical distribution of dominant reef corals in the eastern Pacific. *Proc Biol Sci*, 271: 1757–1763
- James N P, Macintyre I G. 1985. Reefs: Zonation, depositional facies, diagenesis. *Quart Colorado School Mines*, 80: 1–70
- Karl D, Michaels Q, Bergman B, et al. 2002. Dinitrogen fixation in the world's oceans. *Biogeochemistry*, 57/58: 47–98
- Knowlton N, Jackson J B C. 2008. Shifting baselines, local impacts, and global change on coral reefs. *PLoS Biol*, 6: 215–220
- Madin J S, Connolly S R. 2006. Ecological consequences of major hydrodynamic disturbances on coral reefs. *Nature*, 444: 477–480
- Nakamori T, Suzuki A, Iryu Y. 1992. Water circulation and carbon flux on Shiraho coral reef of the Ryukyu Islands, Japan. *Continental Shelf Res*, 12: 951–970
- Nyström M, Folke C, Moberg F. 2000. Coral reef disturbance and resilience in a human-dominated environment. *Trends Ecol Evol*, 15: 413–417
- Precht W F, Miller S L. 2007. Ecological shifts along the Florida reef tract. The past is a key to the future. In: Aronson R B, ed. *Geological Approaches to Coral Reef Ecology*. New York: Springer. 237–312
- Richardson L L, Kuta K G. 2003. Ecological physiology of the black band disease cyanobacterium *Phormidium corallyticum*. *FEMS Microbiol Ecol*, 43: 287–298
- Ritson-Williams R, Paul V J, Bonito V. 2005. Marine benthic cyanobacteria overgrow coral reef organisms. *Coral Reefs*, 24: 629–629
- Rogers C S. 1990. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Mar Ecol Progr Ser*, 62: 185–202
- Rogers J S, Monismith S G, Feddersen F, et al. 2012. Wave-driven hydrodynamics of spur-and-groove formations on a coral reef. 2012 Ocean Sciences Meeting, Salt Lake City. 20–24
- Schneider J, Le Campion-Alsumard T. 1999. Construction and destruction of carbonates by marine and freshwater cyanobacteria. *Eur J Phycol*, 34: 417–426
- Sheppard C R C. 1981. The groove and spur structures of Chagos atolls and their coral zonation. *Estuar Coast Shelf Sci*, 12: 549–560
- Titlyanov E A, Yakovleva I M, Titlyanova T V. 2007. Interaction between benthic algae (*Lyngbya bouillonii*, *Dictyota dichotoma*) and scleractinian coral *Porites lutea* in direct contact. *J Exp Mar Biol Ecol*, 342: 282–291
- Whitton B A, Potts M. 2000. *The Ecology of Cyanobacteria—Their Diversity in Time and Space*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 704
- Wilkinson C. 2004. *Status of coral reefs of the World: 2004*. Vol. 2. Status of Coral Reefs of the World
- Wood R. 1998. The ecological evolution of reefs. *Annu Rev Ecol Syst*, 29: 179–206
- Wu Z J, Wang D R, Tu Z G, et al. 2011. The analysis on the reason of hermatypic coral degradation in Xisha. *Acta Oceanol Sin*, 33: 140–146
- Zhou J D, Yang Z C, Peng S H, et al. 2007. The concentrations of dissolved heavy metals in Xisha waters and their influential factors. *J Univ Sci Tech China*, 37: 1036–1042