

三亚鹿回头石珊瑚物种多样性的空间分布

赵美霞^{1,2}, 余克服¹, 张乔民¹, 施 祺¹

(1. 中国科学院边缘海重点实验室, 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)

摘要:对三亚鹿回头珊瑚岸礁沿垂直岸线的 5 条断面上 84 个调查样方观测照相和室内判读分析, 鹿回头岸段石珊瑚共有 13 科 24 属 69 种, 珊瑚分布不均, 少数种类优势明显。石珊瑚优势种为澄黄滨珊瑚, 其重要值百分比为 36.62%; 优势属为滨珊瑚属 (43.85%) 和鹿角珊瑚属 (22.88%)。各断面间多样性格局差异明显, 并存在明显的垂直分带现象: 东北部第 1、2 断面石珊瑚种类分布较为均匀, 多样性指数值高于中南部第 3、4、5 断面; 礁坪为珊瑚稀疏生长带, 种类较少且滨珊瑚为绝对优势属 (重要值百分比 > 50%); 礁坡为珊瑚密集生长带, 种类较多以鹿角珊瑚最占优势 (28.33%), 滨珊瑚仅次之 (26.71%)。近年来该岸段珊瑚礁衰退趋势明显, 不合理的破坏性人类活动是重要原因。石珊瑚多样性的空间差异除因礁坪礁坡不同的自然环境外, 主要与受到不同类型和强度的人类活动有关。礁坪大潮低潮时暴露, 环境恶劣, 且受人类采挖、践踏活动影响较频繁和明显; 礁坡环境适宜, 人类活动影响也相对微弱。养殖、捕捞和近岸排污等人类活动在岸段中南部较为突出, 对珊瑚多样性的影响比东北部明显。在尊重珊瑚礁发育的自然规律基础上不断加大力度制止养殖、不合理捕捞和近岸排污等破坏性人类活动, 才能更好地科学保护和管理该岸段珊瑚礁。

关键词:珊瑚礁; 生物多样性; 空间分布; 鹿回头

文章编号: 1000-0933(2008)04-1419-10 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Spatial pattern of coral diversity in Luhuitou fringing reef, Sanya

ZHAO Mei-Xia^{1,2}, YU Ke-Fu¹, ZHANG Qiao-Min¹, SHI Qi¹

1 CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1419 ~ 1428.

Abstract: 84 quadrats from 5 vertical transects on Luhuitou fringing reef are investigated in detail using video-quadrat and indoor-interpretation methods. The results show that: (1) The reef consists of 69 species of hermatypic corals belonging to 24 genera and 13 families which are unevenly distributed in abundance. (2) Among all the corals, *Porites lutea* is the most dominant species with importance value percentages up to 36.62%; *Porites* and *Acropora* are dominant genera, with importance value percentages as 43.85% and 22.88%, respectively. (3) There exist distinct spatial differences in coral communities; both the coral covers and coral diversity indexes in the northeastern transects are higher than those in the central and southern transects. (4) Coral communities also show remarkable zonal characteristics, with less coral species occurring in reef flat than in reef slope. The importance value percentage of the sole dominant coral genus, *Porites*, is over 50%, while in the reef slope, the importance value percentages are 28.33% for the first dominant genus *Acropora* and

基金项目:中国科学院创新资助项目(KZCX3-SW-220); 海洋公益性行业科研专项资助项目(200705026); 国家自然科学基金面上资助项目(40406018)

收稿日期:2007-01-18; **修订日期:**2007-12-12

作者简介:赵美霞(1981~), 女, 山东省菏泽市人, 博士生, 主要从事珊瑚礁生物与生态研究. E-mail: zhaomeix@scsio.ac.cn

Foundation item: This work was financially supported by the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-220), the Marine Nonprofit Project (No. 200705026); the National Natural Science Foundation of China (No. 40406018)

Received date: 2007-01-18; **Accepted date:** 2007-12-12

Biography: ZHAO Mei-Xia, Ph. D. candidate, mainly engaged in coral reef biology and ecology. E-mail: zhaomeix@scsio.ac.cn

26.71% for the second dominant genus *Porites*. Our further analysis suggests that the spatial and zonal differences of coral diversity pattern are correlated with both natural environmental changes and human activities. The shallow water reef flat frequently exposes at low tide and receives more anthropogenic influences (including dredging and trampling) than the deep water reef slope. Thus, the coral community in the reef flat is not as well developed as that in reef slope. The relatively poor coral covers and coral diversity indexes in the central and southern transects are closely related to heavy human activities around these sites, such as aquaculture, fishing and coastal sewage. Therefore, the impact of human activities must be taken into account when developing strategies for the protection of this coral reef.

Key Words: coral reef; biodiversity; spatial pattern; Luhuitou (Sanya)

珊瑚礁是海洋中一类极为特殊的生态系统,具有较高的生物多样性和初级生产力,向人类社会提供各种产品和服务,发挥着重要的生态功能^[1~3]。近年来,由于全球气候变化和人类活动的影响,珊瑚礁生态系统出现了明显衰退^[4~7],有研究预测在今后几十年内仍有继续退化趋势^[8],保护珊瑚礁已经迫在眉睫。划定保护区、制定有效的保护管理措施等都需要依据珊瑚礁生物群落的时空变化规律来进行^[6,9],但目前国际上关于珊瑚多样性空间特征和维持机制的研究还处在早期发展阶段^[10~13],对多样性的空间差异缺乏系统了解,这一方面刺激了对珊瑚礁生态系统的内在特征进行研究,另一方面也阻碍了珊瑚礁保护管理工作的进程和成效。所以,需要集中在珊瑚多样性的空间特征方面进行更多的研究^[14],这些研究将有利于加深对生态完整性的理解,进一步修正保护策略、改进管理措施来更好地保护珊瑚礁,使其继续维持高生物多样性、发挥关键生态功能。

三亚鹿回头珊瑚礁(109°28'E, 18°13'N)位于海南岛最南端,是典型的珊瑚岸礁,1990年被列入三亚国家级珊瑚礁自然保护区。自20世纪50年代末以来,国内外珊瑚和珊瑚礁专家在该岸段曾开展过多次珊瑚礁调查,积累了宝贵的文献资料,成果涉及沉积^[15,16]、地质^[17,18]、地貌^[19,20]和生物学^[21~23]等各领域。但对石珊瑚多样性的研究较少,且仅是记录珊瑚种类和对珊瑚分布作定性描述^[19,21~26],对空间分布特征缺乏量化的细致研究,这种状况局限了对该岸段珊瑚多样性现状的系统认识,更难以提出珊瑚礁保护和恢复合理措施提供可靠的理论根据。

基于此,本文在该礁区进行系统取样,通过现场观察和室内分析研究石珊瑚物种多样性空间特征并探究原因,以期对该岸段珊瑚礁生物多样性有更多的了解,并为科学保护管理该岸段珊瑚礁提供参考。

1 研究地区概况

三亚鹿回头珊瑚礁位于海南岛南端三亚湾东岸,鹿回头半岛西岸(图1),岸礁发育非常典型,长约3km,平均宽度约为250m,最大宽度可超过450m。该岸段礁坪宽阔平坦,可划分为没有活珊瑚生长的内礁坪和有小而分散的活珊瑚生长的外礁坪^[20]。礁坡狭窄而坡陡,活珊瑚生长茂密。该岸段邻近三亚市和三亚港,是维持生物多样性和资源生产力的海岸生态关键区^[27],也是当地居民赖以生存的重要经济来源地。长期以来当地居民从珊瑚礁取得海产品、建筑材料和观赏工艺品等,近年来该区的潜水旅游也日渐兴盛。

鹿回头珊瑚礁区属于热带季风气候,全年平均以东北风和东风为主;距鹿回头东北部约8km的榆林海洋水文观测站连年观测资料显示该岸段海水温度、降水和

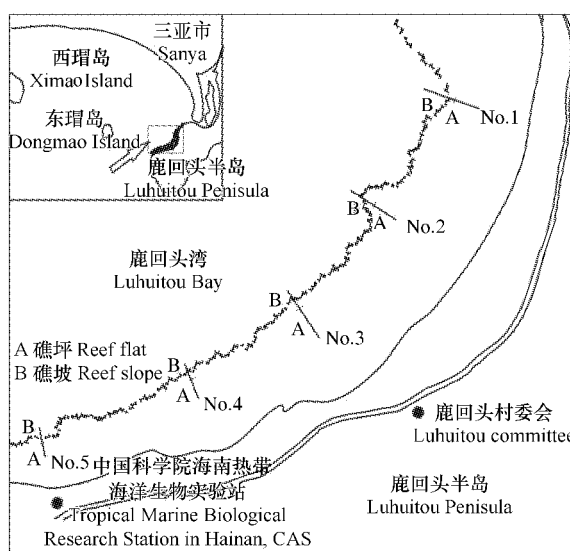


图1 三亚鹿回头珊瑚岸礁的地理位置和5条调查断面图
Fig. 1 Coral reef geographic location and 5 transects at Luhuitou, Sanya

日照时数存在明显的季节性变化:年平均表层海温(SST)为 26.9℃,最低 SST 出现在 12 月~次年 2 月,平均为 23.2℃,最高 SST 出现在 5~9 月份,平均为 29.5℃;年平均降水量 1278mm,旱季出现在 11 月至翌年 2 月份,仅有 155mm,雨季出现在 5~10 月,可达 1123mm;年平均日照时数为 2489h,2 月份日照时数最短,约 161h,5~8 月份日照时数较长,月均可达 229h。潮汐属不正规日潮混合潮,以日潮为主,平均潮位 1.02m,平均潮差 0.79m,最大潮差 1.89m^[28]。波浪受季风影响以风浪为主,冬半年(10 月~翌年 4 月份)盛行东或东北向浪,夏半年(5~9 月份)以南或西南向浪为主。本次现场调查实测海水盐度为 33.8~34.1,海水透明度约为 4~6m。总体来看,本区的气象、水文和水质环境等研究表明该岸段自然环境条件较适宜于珊瑚生长。

2 研究方法

本研究的野外调查工作主要分两次进行:第一次是在 2005 年 4 月份采用系统取样法沿鹿回头礁区由北向南的 5 条断面(大体和 1998 年设立的与海岸垂直的 5 条调查断面一致)进行样方调查。首先沿断面从潮间带珊瑚生长的上限到珊瑚分布的下限为止布设样条皮尺,然后参照皮尺刻度在样条上等距离放置 1m×1m 的正方形样方,样方间隔为 10m,则每断面样方个数分别为 20、20、20、15、9,样地范围内共放置 84 个调查样方。调查除进行现场水下观察记录外,还对每样方垂直拍照,每张照片分别记录 1/4 样方面积,在实验室将 4 张照片拼接从中进一步判读珊瑚群落信息;对断面上每样方内及样地范围内断面附近的石珊瑚种类进行特写拍照,特别是那些在水下较难辨认的种类,高分辨率的特写照片可用来鉴定珊瑚种类。另外,调查船沿样条缓慢匀速行驶对断面进行水深测量和 GPS 定位,结合潮汐预报值利用定位和高程数据(实测水深减去当时潮高得实际水深,水深取负值得高程)分别绘制各调查断面的地理位置和地形剖面图(图 2)。参考珊瑚礁生物地貌结论中的理论最低潮位是礁坪和礁坡分界线^[19],将每断面划分为礁坪和礁坡两个地貌带,并分别统计每断面礁坪、礁坡带所包含的样方数和样条长度(表 1)。第二次调查是在 2006 年 4 月份,主要完成标本采集和珊瑚种类特写照片的补充拍摄工作。

表 1 断面样方调查统计表

Table 1 The statistics of quadrats in transects survey

断面序号 Transects number	礁坪 Reef flat		礁坡 Reef slope		断面总计 Total	
	样方数(个)	长度(m)	样方数(个)	长度(m)	样方数(个)	长度(m)
	Number of quadrats	Length of transects	Number of quadrats	Length of transects	Number of quadrats	Length of transects
1	7	110	13	130	20	240
2	9	130	11	110	20	240
3	13	120	7	70	20	190
4	8	70	7	70	15	140
5	4	30	5	50	9	80
合计 Total					84	

室内分析工作主要包括石珊瑚种类的鉴定、优势类群的统计和多样性指数计算分析等。

鉴定石珊瑚种类 利用石珊瑚种类的特写照片和采集到的标本,借助计算机和显微镜放大功能,参照珊瑚分类学专业文献图版和微细结构描述^[29~33],并结合该礁区以往珊瑚种属研究资料^[21,24,26]进行种类鉴定。珊瑚种类的特写照片使得照片鉴定的准确度大大提高,对于利用特写照片仍很难鉴定的少量珊瑚种则采集标本进一步确认,这种方法不仅节省了大量时间和精力采集标本,而且也大大减少了取样过程对珊瑚礁造成的破坏影响。

石珊瑚优势类群 优势类群由各种珊瑚的重要值(IV: Importance Value)排序获得。通过判读样方图像资料,统计计算每种珊瑚的相对多度(RA: Relative Abundance,该种珊瑚的群体总数与所有种珊瑚的群体数之比)、相对频度(RF: Relative Frequency,该种珊瑚的频度与所有种珊瑚的频度总和之比,其中频度为一个种出现的样方数与调查样方的总数之比)和相对覆盖度(RC: Relative Coverage,该种珊瑚的覆盖面积与所有种珊瑚总覆盖面积之比),3 种数值的总和即为该种珊瑚的重要值,重要值百分比为该种重要值与所有种重要值总和的比值。同样方法计算每属珊瑚的重要值和重要值百分比。

多样性指数分析 多样性指数是反映丰富度和均匀度的综合指标,描述多样性的指数很多,Simpson 指数^[34]和 Shannon-Wiener 指数^[35]应用最为广泛,需要指出的是应用多样性指数时,具低丰富度和高均匀度的群落与具高丰富度与低均匀度的群落可能得到相同的多样性指数,所以参考独立的丰富度指数(Margalef 丰富度指数^[36])和均匀度指数(Pielou 均匀度指数^[37])分析极为必要,故本文选择 4 种指数一起分析:

$$\text{Shannon-Wiener 指数} \quad H' = - \sum p_i \ln p_i \quad p_i = \frac{n_i}{n}$$

$$\text{Simpson 指数} \quad D = 1 - \sum p_i^2$$

$$\text{Pielou 均匀度指数} \quad J = \frac{H'}{H_{\max}} \quad H_{\max} = -\ln s$$

$$\text{Margalef 丰富度指数} \quad d = \frac{s-1}{\ln N}$$

式中, s 为珊瑚种类总种数 $i = 1, 2, \dots, s$

3 结果与讨论

3.1 石珊瑚群落组成及其空间结构

通过鉴定珊瑚种类的特写照片和实采标本相结合的方法,2005 ~ 2006 年两次珊瑚礁调查共记录石珊瑚 13 科 24 属 69 种,其中有 10 科 18 属 40 种出现在调查样方里。通过判读样方图像,计算每种珊瑚的重要值和重要值百分比,得到澄黄滨珊瑚为该岸段优势种,其重要值百分比为 36.62%,远远高于佳丽鹿角珊瑚、普哥滨珊瑚、风信子鹿角珊瑚和指状蔷薇珊瑚(重要值百分比分别为 8.89%、6.45%、5.62% 和 5.03%);而重要值百分比低于 1% 的珊瑚有 25 种,低于 0.5% 的 15 种,由此可以看出该岸段珊瑚种类分布不均,优势种明显,其他珊瑚种类生长受限,重要值偏低。同样方法得到优势属为滨珊瑚属(43.85%)和鹿角珊瑚属(22.88%),优势科为滨珊瑚科(48.05%)、鹿角珊瑚科(33.53%)和蜂巢珊瑚科(10.43%)(表 2)。

在从北到南 5 条断面上,石珊瑚的种类组成和优势种属分布各有不同,第 2、4 断面珊瑚种类最多,分别为 14 属 24 种和 12 属 25 种,第 5 断面珊瑚种类最少(7 属 9 种)。澄黄滨珊瑚在 5 条断面均占绝对优势,重要值百分比平均为 37%;鹿角珊瑚属在第 1、3、4 断面的重要值百分比均超过 20%,其中最主要的贡献种类是佳丽鹿角珊瑚和风信子鹿角珊瑚,风信子鹿角珊瑚在第 1 断面的重要值百分数达 17.11%,佳丽鹿角珊瑚的重要值百分比在第 3、4 断面分别为 11.30% 和 18.15%;蔷薇珊瑚属在 5 条断面重要值百分比平均约为 9.43%,在第 3、4 断面超过 12%。值得注意的是第 3 断面的扁脑珊瑚属和第 1 断面的牡丹珊瑚属的重要值百分比也较高,分别为各断面的 8.07% 和 15.79%。

礁坪、礁坡的石珊瑚种类组成和优势种属也有显著不同,呈明显带状分布:礁坪珊瑚种类较少且稀疏生长,滨珊瑚属占绝对优势,其重要值百分比大于 50%,其次是鹿角珊瑚属(17.18%)和蔷薇珊瑚属(12.51%),其他珊瑚重要值偏低;礁坡珊瑚种类丰富共有 15 属 34 种,珊瑚密集生长,以鹿角珊瑚最占优势(28.33%),滨珊瑚仅次之(26.71%)。即使在同一生物地貌带,珊瑚群落也有明显的空间差异,在礁坪带,第 1 ~ 5 断面的珊瑚种类分别为 7、13、4、8、4 种,其中第 5 断面礁坪珊瑚种类最少,澄黄滨珊瑚重要值百分数达 49.67%;第 4 断面重要值百分比超过 10% 以上的珊瑚种类除澄黄滨珊瑚外,还有指状蔷薇珊瑚和粗糙菊花珊瑚;而在第 3 断面除澄黄滨珊瑚和指状蔷薇珊瑚外,其他种类珊瑚的重要值百分数均低于 5%;第 2 断面珊瑚种类最多,澄黄滨珊瑚的重要值百分数(38.19%)较其他断面稍低,第 1 断面除澄黄滨珊瑚外,其他种类珊瑚重要值百分数均低于 10%。在礁坡带,第 1 ~ 5 断面的珊瑚种类分别为 11、16、10、21、7 种,第 3、4 断面鹿角珊瑚(约 50%)占绝对优势,最主要贡献者是佳丽鹿角珊瑚(27.53% 和 31.79%);第 1 断面的风信子鹿角珊瑚是鹿角珊瑚中最主要贡献者,重要值百分比为 24.39%;第 2 断面礁坡珊瑚种类较多,但只有一种鹿角珊瑚(松枝鹿角珊瑚),而二异角孔珊瑚的重要值颇高(20.61%);第 5 断面的礁坡样方中未见鹿角珊瑚,滨珊瑚重要值百分比超过 45%。

表 2 三亚鹿回头石珊瑚重要值列表

Table 2 The importance value of coral species at Luhuitou fringing reef, Sanya

科名(重要值排序) Family(sequence number of IV)	属名(重要值排序) Genus(sequence number of IV)	种名(重要值排序) Species(sequence number of IV)	相对多度 (RA)	相对频度 (RF)	相对覆盖率 (RC)	重要值 (IV)
鹿角珊瑚科(2)	鹿角珊瑚属(2)	浪花鹿角珊瑚 <i>A. cytherea</i> (8)	0.031	0.046	0.032	0.108
Acroporidae	<i>Acropora</i>	松枝鹿角珊瑚 <i>A. brueggemanni</i> (11)	0.011	0.025	0.029	0.065
		风信子鹿角珊瑚 <i>A. hyacinthus</i> (3)	0.026	0.030	0.138	0.194
		伞房鹿角珊瑚 <i>A. corymbosa</i> (31)	0.003	0.005	0.001	0.009
		强壮鹿角珊瑚 <i>A. valida</i> (20)	0.003	0.010	0.007	0.020
		美丽鹿角珊瑚 <i>A. formosa</i> (29)	0.001	0.005	0.003	0.009
		粗野鹿角珊瑚 <i>A. humilis</i> (35)	0.001	0.005	0.001	0.007
		佳丽鹿角珊瑚 <i>A. pulchra</i> (2)	0.134	0.066	0.067	0.267
		<i>A. insignis</i> (38)	0.001	0.005	0.001	0.007
	星孔珊瑚属(11)	多星孔珊瑚	0.007	0.010	0.009	0.025
	<i>Astreopora</i>	<i>A. myriophthalma</i> (17)				
	蔷薇珊瑚属(3)	繁锦蔷薇珊瑚 <i>M. efflorescens</i> (37)	0.001	0.005	0.001	0.007
	<i>Montipora</i>	壁全蔷薇珊瑚 <i>M. circumvallata</i> (19)	0.005	0.010	0.008	0.023
		指状蔷薇珊瑚 <i>M. digitata</i> (5)	0.059	0.066	0.026	0.151
		何氏蔷薇珊瑚 <i>M. hoffmeisteri</i> (7)	0.027	0.061	0.025	0.113
菌珊瑚科(4)	牡丹珊瑚属(5)	十字牡丹珊瑚 <i>P. decussata</i> (9)	0.015	0.030	0.061	0.106
Agariciidae	<i>Pavona</i>	叶状牡丹珊瑚 <i>P. frondifera</i> (27)	0.005	0.005	0.002	0.013
木珊瑚科(9)	陀螺珊瑚属(17)	盾形陀螺珊瑚 <i>T. peltata</i> (39)	0.001	0.005	0.001	0.007
Dendrophylliidae	<i>Turbinaria</i>					
蜂巢珊瑚科(3)	刺星珊瑚属(12)	锯齿刺星珊瑚 <i>C. serailia</i> (18)	0.004	0.015	0.006	0.025
Faviidae	<i>Cyphastrea</i>					
	双星珊瑚属(16)	同双星珊瑚 <i>D. heliopora</i> (34)	0.001	0.005	0.002	0.008
	<i>Diploastrea</i>					
	角蜂巢珊瑚属(6)	秘密角蜂巢珊瑚 <i>F. abdita</i> (10)	0.016	0.030	0.032	0.078
	<i>Favites</i>	多弯角蜂巢珊瑚 <i>F. flexuosa</i> (28)	0.001	0.005	0.006	0.013
	蜂巢珊瑚属(13)	标准蜂巢珊瑚 <i>F. speciosa</i> (23)	0.001	0.005	0.010	0.017
	<i>Favia</i>					
	菊花珊瑚属(8)	粗糙菊花珊瑚 <i>G. aspera</i> (13)	0.013	0.025	0.013	0.052
	<i>Goniastrea</i>	梳状菊花珊瑚 <i>G. pectinata</i> (24)	0.003	0.010	0.004	0.017
		网状菊花珊瑚 <i>G. retiformis</i> (25)	0.007	0.005	0.004	0.016
	扁脑珊瑚属(7)	交错扁脑珊瑚 <i>P. crosslandi</i> (16)	0.007	0.010	0.012	0.029
	<i>Platygyra</i>	精巧扁脑珊瑚 <i>P. daedalea</i> (26)	0.003	0.010	0.001	0.014
		中华扁脑珊瑚 <i>P. sinensis</i> (14)	0.003	0.005	0.038	0.046
裸肋珊瑚科(8)	刺柄珊瑚属(15)	腐蚀刺柄珊瑚 <i>H. exesa</i> (33)	0.001	0.005	0.002	0.008
Merulinidae	<i>Hydnophora</i>					
褶叶珊瑚科(7)	合叶珊瑚属(14)	菌状合叶珊瑚 <i>S. agaricia</i> (30)	0.001	0.005	0.003	0.009
Mussidae	<i>Symphyllia</i>					
枇杷珊瑚科(6)	盃形珊瑚属(10)	丛生盃形珊瑚 <i>G. fascicularis</i> (21)	0.003	0.010	0.006	0.018
Oculinidae	<i>Galaxea</i>	稀杯盃形珊瑚 <i>G. astreata</i> (22)	0.003	0.010	0.004	0.017
梳状珊瑚科(10)	梳状珊瑚属(18)	莴苣梳状珊瑚 <i>P. lactuca</i> (40)	0.001	0.005	0.000	0.007
Pectiniidae	<i>Pectinia</i>					
杯形珊瑚科(5)	杯形珊瑚属(9)	鹿角杯形珊瑚 <i>P. damicornis</i> (12)	0.012	0.036	0.006	0.054
Pocilloporidae	<i>Pocillopora</i>					
滨珊瑚科(1)	滨珊瑚属(1)	澄黄滨珊瑚 <i>P. lutea</i> (1)	0.534	0.274	0.290	1.099
Poritidae	<i>Porites</i>	扁枝滨珊瑚 <i>P. andrewsi</i> (36)	0.001	0.005	0.001	0.007
		坚实滨珊瑚 <i>P. solida</i> (15)	0.008	0.020	0.012	0.041
		普哥滨珊瑚 <i>P. pukoensis</i> (4)	0.026	0.066	0.077	0.169
	角孔珊瑚属(4)	二异角孔珊瑚 <i>G. duofasciata</i> (6)	0.017	0.041	0.059	0.117
	<i>Goniopora</i>	小角孔珊瑚 <i>G. minor</i> (32)	0.001	0.005	0.002	0.009

3.2 多样性指数分析及其空间差异

对样方石珊瑚总体进行多样性指数分析,结果如表3所示,随着科、属、种分类的逐渐细化,多样性指数值呈现增大趋势,但均匀度 J 值保持较低值,说明该岸段珊瑚种类分布不均。这一点和在群落组成分析中得到的结论一致:滨珊瑚重要值较大,优势明显;其他多数珊瑚重要值百分比较低,生长受限。

对每样方珊瑚种类进行多样性指数分析,结果发现指数 H' 、 D 、 d 之间存在强相关关系(相关系数分别为0.93,0.97,0.90),指数值随样方变化明显,而均匀度指数 J 变化基本没有规律性,这说明样方珊瑚多样性与种类丰富度关系密切,选用的多样性指数 H' 、 D 都能够较好反映样方珊瑚多样性变化。按照多样性指数 H' 、 D 、 d 在断面样方序列上的变化特征不同可将5条断面分为两组(图3):第1、2断面为一组,多样性状况在礁

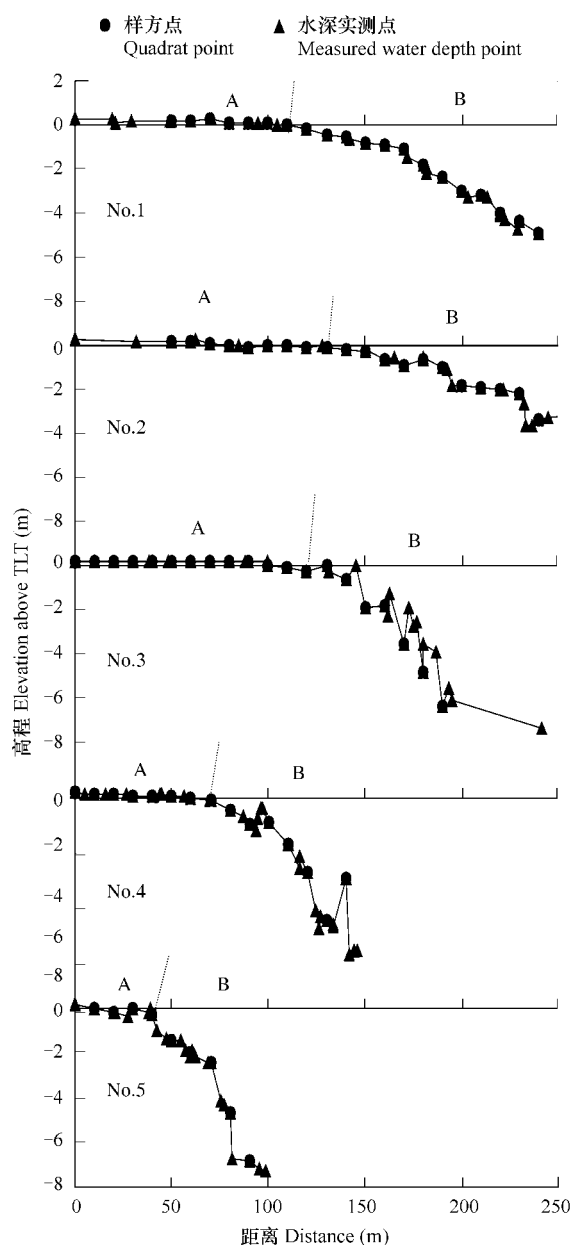


图2 调查断面地形剖面图和取样样方位置图

Fig. 2 Topographic profiles of 5 transects and the location of sampling quadrats

A: 礁坪 B: 礁坡 A: reef flat B: reef slope

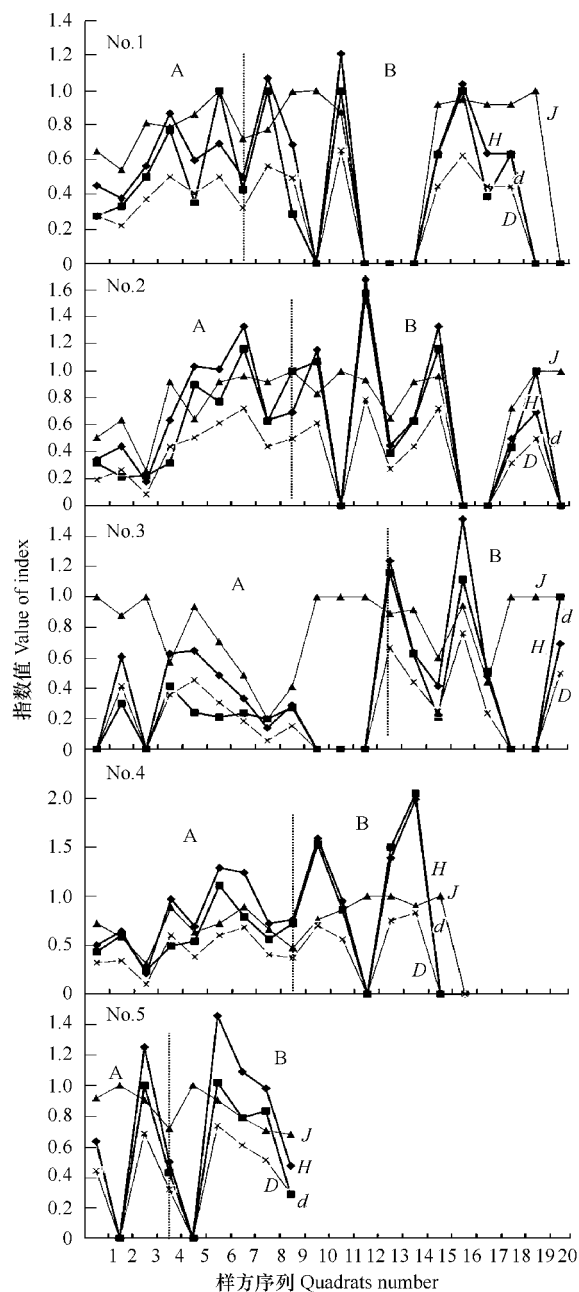


图3 鹿回头各断面样方序列上的珊瑚多样性指数变化

Fig. 3 Change of diversity index value among quadrats in 5 transects

A: 礁坪 B: 礁坡 A: reef flat B: reef slope

坪礁坡变化不明显;第3、4、5断面为一组,其多样性指数值沿样方序列变化明显,高低值截然分开,且分界点与依据水深测量划分的礁坪、礁坡的临界点基本一致。

珊瑚种类少的礁坪,多样性水平整体偏低(图4),其中,第2断面多样性指数 H' 、 d 出现较高值;第5断面丰富度指数 d 值最低, J 值最高;第3断面珊瑚种类少(7种)、群体多(207个),仅澄黄滨珊瑚就有178个,分布极不均匀,多样性指数 H' 、 d 、 J 、 D 均出现低值,分别为0.55,0.78,0.28,0.25。珊瑚种类较多的礁坡,珊瑚丰富度较高,多样性水平整体较高(图4),其中,种类最多(21种)的第4断面丰富度指数最高, d 值为3.02;第3断面多样性指数 H' 、 D 出现低值,珊瑚多样性水平最低。同时,参考 H' 、 D 两项多样性指数在礁坡的分布规律不同可将5条断面分成两组:第1、2断面为一组,多样性指数相对较高($H > 2.0$, $D > 0.85$),第3、4、5断面为另一组,多样性水平较低($H < 2.0$, $D < 0.75$)。

表3 鹿回头岸段珊瑚多样性指数分析表
Table 3 Value of coral diversity index at Luhuitou fringing reef

	H'	d	J	D	N	S
科 Family	1.04	0.94	0.45	0.55	747	10
属 Genus	1.42	1.78	0.49	0.62	747	18
种 Species	1.96	4.09	0.53	0.69	747	40

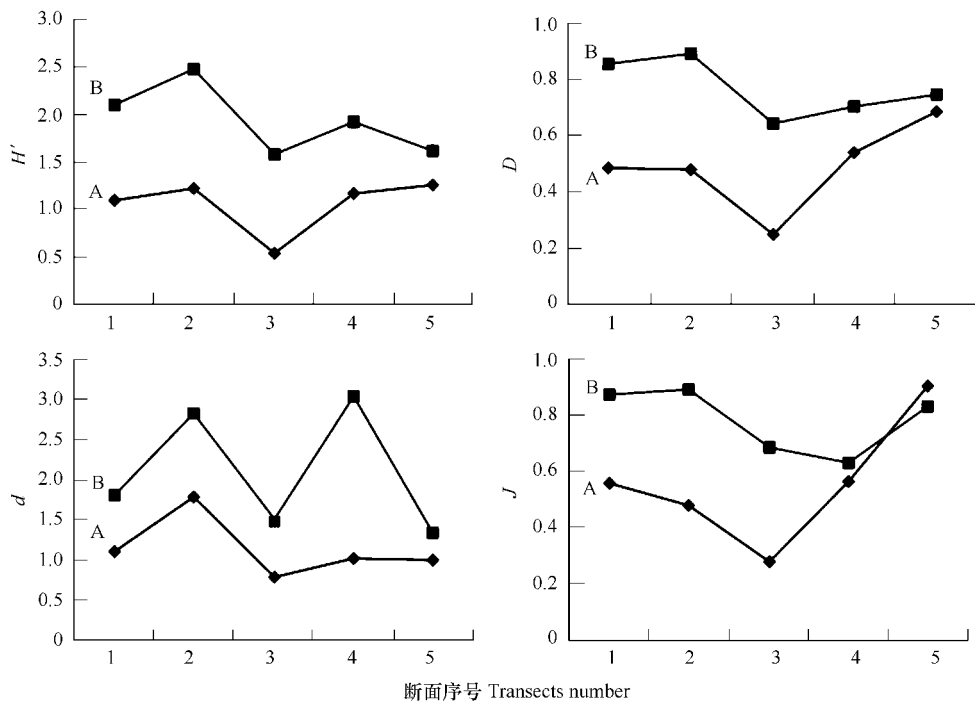


图4 鹿回头各断面在礁坪A、礁坡B的珊瑚多样性比较

Fig. 4 Comparison of coral diversity among 5 transects at Luhuitou fringing reef. A: reef flat B: reef slope

3.3 石珊瑚物种多样性空间差异的原因分析

三亚鹿回头珊瑚礁岸段的石珊瑚多样性在不同生物地貌带的差异表现为在礁坪、礁坡呈明显带状分布:礁坪珊瑚种类较少,以滨珊瑚优势明显,多样性水平低;礁坡珊瑚种类较多,以鹿角珊瑚最占优势,滨珊瑚次之,礁坡的珊瑚多样性水平整体高于礁坪。带状分布的差异主要是由于礁坪、礁坡的自然环境条件不同^[38,39]:礁坪在低潮时常会不同程度地暴露在空气中,局部出现水循环受限、海水含氧量不足、海水温度波动性变化等不利于珊瑚生长的情况;礁坡一般在理论最低潮面以下不露出水面,坡度陡峭、生境多样,有较为适宜珊瑚生长的光照、温盐、波浪等自然条件,但是随着深度不断增加和海水混浊度的影响,射入水下的光线越

来越弱直至消失,珊瑚不再生长。群落垂直分带现象在珊瑚礁区相当普遍^[40~43],在发育良好的珊瑚礁区,礁坪和礁坡还有亚带分布,例如东印度洋 Ko Phuket 礁坪^[40]和 Hawaiian reef 礁坡^[41]。该岸段礁坪宽阔平坦,除因时常暴露空气造成的自然环境条件恶劣外,由于水深较浅更易受到人类活动影响,采挖珊瑚和潜水践踏活动在该岸段礁坪表现明显^[44],块状滨珊瑚适应能力较强,多分散生长,扁平而有分枝的蔷薇珊瑚和小而枝短的佳丽鹿角珊瑚少量零星分布;礁坡水深、坡陡,有较为适宜的自然环境条件,且受到人类活动的影响相对较弱,珊瑚种类较多、丛生分布。由于海水透明度和深度对光照的耦合影响,该岸段水深 5.5m 以下除个别大块滨珊瑚外,基本没有珊瑚生长。

20 世纪 50~60 年代该岸段珊瑚礁发育良好,礁坪、礁坡均生长着茂盛的珊瑚群落,垂直分带且各带优势类群明显,高生物多样性特点突出^[21,23~24];70~80 年代时礁坪已不见成片的活珊瑚,礁坡珊瑚群落繁茂程度也不如以前^[45];90 年代珊瑚种类明显减少,但礁坡仍保持较高的生物多样性^[44~47];最新调查表明该岸段礁坪以澄黄滨珊瑚为优势种,礁坡鹿角珊瑚仍占优势,但优势度降低且珊瑚多样性指数值降低,近 50 年来的演变特征表明该岸段珊瑚礁呈衰退趋势^[48]。1998 年全球出现严重白化事件后,全球持续变暖引起的海水温度上升被认为是影响珊瑚礁退化的最主要原因之一。三亚莺歌海海洋观测站资料显示近数十年来三亚附近海域表层海温(SST)存在上升趋势^[49],但该礁区尚未发现明显白化表现,也没有其他证据,该区珊瑚礁对温度变化的生态响应需要进一步深入研究,而人类活动可能是造成该岸段珊瑚礁现有衰退并影响将来发展的重要因素:过度捕捞和炸鱼等破坏性捕捞以及大规模采挖珊瑚礁块等直接导致了该岸段珊瑚礁在 70~80 年代受到严重破坏;90 年代海上大规模养殖珍珠贝、麒麟菜等,1998 年和 2002 年潜水观测时水下多处可见养殖残留的缆绳、浮球、桩柱、鱼网等缠绕和覆盖珊瑚;近年来沿岸养殖蓬勃发展,2003 年调查时已有 14 家对虾或鲍鱼育苗场,其污水多通过污水管或污水沟直接排放入海;随着三亚港外人工岛和大型国际旅游客运深水泊位的兴建,外来泥沙和污染物的影响在未来几年可能会凸现出来。此外,快艇观光和海底潜水等旅游活动对该岸段珊瑚礁直接破坏也日渐明显。

石珊瑚物种多样性在 5 条断面之间的存在空间差异表现在东北部第 1、2 断面的样方序列多样性相对于中、南部第 3、4、5 断面变化不明显,而且其礁坡多样性比中、南部断面稍高。这可能与断面所在区域受到不同类型和强度的人类活动影响有关。调查发现:东北部附近的养殖场和排污量较少,邻近的对虾或鲍鱼育苗场有 4 家,而靠近中南部的对虾或鲍鱼育苗场有 10 家,2004 年中部岸段还有一家海鲜餐馆在营业,其污水通过污水管直接排入珊瑚礁海区,不过该餐馆已于 2004 年年底关闭;5 条断面都曾受到不合理捕捞、大规模麒麟菜养殖的影响,现在该岸段已经禁止该类活动,但调查期间仍多次遇到捕捞、采集和炸鱼等个案,中南部出现频率较多,而且在岸段中南部水下发现的养殖残留垃圾和捕捞、炸鱼痕迹也比东北部较多。一般来说,自然灾害导致的生态破坏,灾害过后生态系统会自然恢复,而由环境压力造成的生态系统衰退,一旦环境压力消失也可以自然恢复^[50],针对该岸段珊瑚礁的衰退趋势和空间特征,在尊重珊瑚礁发育的自然规律基础上需要不断加大管理力度,制止养殖、不合理捕捞和近岸排污等破坏性人类活动,进一步缓解该礁区受到的环境压力,不断改善生态环境促使珊瑚礁逐渐恢复。

4 结论

(1) 三亚鹿回头珊瑚岸礁区石珊瑚共 13 科 24 属 69 种,优势种为澄黄滨珊瑚,其重要值百分比为 36.62%,优势属为滨珊瑚属(43.85%)和鹿角珊瑚属(22.88%),重要值百分比低于 1% 的珊瑚有 25 种,低于 0.5% 的 15 种,珊瑚种类分布不均,优势种明显。

(2) 各断面间物种多样性格局差异明显,并存在明显的垂直分带现象。东北部第 1、2 断面石珊瑚种类分布较为均匀,多样性指数值高于中南部第 3、4、5 断面。滨珊瑚属在 5 条断面均占绝对优势,重要值百分比平均为 37%,鹿角珊瑚属在第 1、3、4 断面优势明显,重要值百分比均超过 20%。礁坪为珊瑚稀疏生长带,种类较少且滨珊瑚为绝对优势属(重要值百分比 > 50%);礁坡为珊瑚密集生长带,种类丰富共有 15 属 34 种,以鹿角珊瑚最占优势(28.33%),滨珊瑚仅次之(26.71%)。

(3) 近年来该岸段珊瑚礁衰退趋势明显, 不合理的破坏性人类活动是重要原因。石珊瑚多样性的空间差异除因礁坪礁坡不同的自然环境外, 主要与受到不同类型和强度的人类活动有关。礁坪大潮低潮时暴露, 环境恶劣, 且受人类采挖、践踏活动影响较频繁和明显; 礁坡环境适宜, 人类活动影响也相对微弱。养殖、捕捞和近岸排污等人类活动在岸段中南部较为突出, 对珊瑚多样性的影响比东北部明显。

References:

- [1] Moberg F, Folke C. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*, 1999, 29: 215—233.
- [2] Spurgeon J P G. The economic valuation of coral reefs. *Marine Pollution Bulletin*, 1992, 4 (11): 529—536.
- [3] Done T J, Ogden J C, Wiebe W J, *et al.* Biodiversity and ecosystem function of coral reefs. In: Mooney H A, Cushman J H, Medina E, *et al.* eds. *Functional Roles of Biodiversity: A Global Perspective*. John Wiley and Sons; SCOPE. 1996.
- [4] Bellwood D R, Hughes T P, Folke C, *et al.* Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 2004, 429: 827—833.
- [5] Hughes T P. Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science*, 1994, 265: 1547—1551.
- [6] Pandolfi J M, Bradbury R H, *et al.* Global trajectories of the long-term decline of coral reef ecosystems. *Science*, 2003, 301: 955—958.
- [7] Toby A, Gardner I, Cote M, *et al.* Long-term region-wide declines in Caribbean Corals. *Science*, 2003, 301: 958—960.
- [8] Sheppard C R C. Predicted recurrences of mass coral mortality in the Indian Ocean. *Nature*, 2003, 425: 294—297.
- [9] Plotkin J B, Muller-Landau H C. Sampling the species composition of a landscape. *Ecology*, 2002, 83: 3344—3356.
- [10] Karlson R H, Cornell H V. Scale-dependent variation in local vs. regional effects on coral species richness. *Ecological Monographs*, 1998, 68: 259—274.
- [11] Cornell H V, Karlson R H. Coral species richness: ecological versus biogeographical influences. *Coral Reefs*, 2000, 19: 37—49.
- [12] Bellwood D R, Hughes T P. Regional-scale assembly rules and biodiversity of coral reefs. *Science*, 2001, 292: 1532—1534.
- [13] Hughes T P, Baird A H, Dinsdale E A, *et al.* Detecting regional variation using meta-analysis and largescale sampling: latitudinal patterns in recruitment. *Ecology*, 2002, 83: 436—451.
- [14] Cleary D F R, Suharsono, Hoeksema B W. Coral diversity across a disturbance gradient in the Pulau Seribu reef complex off Jakarta, Indonesia. *Biodiversity and Conservation*, 2006, 15(11): 3653—3674.
- [15] Gao Z W. The sediment character at Luhuitou fringing reef, Hainan Island. *The collected papers on South China Sea*, Vol. 9, Beijing: Science Press, 1987. 43—53.
- [16] Zhu Z R, Huang J S. The petrologic character of carbonate sediment at Luhuitou tombolo, Sanya, Hainan Island. *The collected papers on South China Sea*, Vol. 9, Beijing: Science Press, 1987. 233—240.
- [17] Cai A Z, Li X Y. The some characters of coral reef in the south Hainan Island. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1964, 6(2): 205—216.
- [18] Zhang M S, Liu J, Li H, *et al.* Basic characteristics and formation time of peripheral coral reefs in Hainan Island. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1990, 10(2): 25—43.
- [19] Zhang Q M. On biogeomorphology of Lu huitou fringing reef of Sanya City, Hainan Island, China. *Chinese Science Bulletin*, 2001 (Supp.) 46: 97—102.
- [20] Zhang Q M, Yu K F, Shi Q. The coastal biogeomorphologic processes of coral reefs of South China. *Marine Geology Letters*, 2003, 19(11): 1—4, 30.
- [21] Zou R L, Song S W, Ma J H. *The hermatypic corals in Hainan Island*. Beijing: Science Press, 1975.
- [22] Yan J S. Hermatypic corals. *Bulletin of Biology*, 1956, (2): 23—27.
- [23] Haymob B, Yan J S, Huang M X. The types of coral reefs in Hainan Island. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1960, 3(3): 157—176.
- [24] Zou R L, Ma J H, Song S W. A Preliminary study on the vertical zonation of the coral reef of Hainan Island. *Oceanologia et limnologia sinica*, 1966, 8(2): 153—160.
- [25] Yu D P, Zou R L. Current situation and dynamics of species diversity in hermatypic coral community on Luhuitou Fringing Reef. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 559—564.
- [26] Yu D P, Zou R L. Study on the species diversity of the scleratinan coral community on Luhuitou Fringing Reef. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 469—475.
- [27] Zhang Q M. Biodiversity of Luhuitou Fringing Reef of Sanya and faced threat. *Science News*, 2003, 9: 24—25.
- [28] Wu X G, Jin B, Wei J F, *et al.* Study on the siltation of Sanya Harbour. *Marine Science Bulletin*, 1998, 17(5): 51—57.
- [29] Veron J. *Corals of the world*. Townsville: Australian Institute of Marine Science, 2000.
- [30] Wallace C C. *Staghorn corals of the world: a revision of the coral genus Acropora*. CSIRO, 1999.
- [31] Zou R L. *Fauna sinica-hermatypic coral*. Beijing: Science Press, 2001.
- [32] Chan A L K, Choi A L S, McCorry D, *et al.* *Field guide to hard corals of Hong Kong*. Hong Kong: Agriculture, Fisheries and Conservation Department, 2005.

- [33] Nie B F, Liang M T, Zhu Y Z, *et al.* The study of the fine skeletal structures of recent reef-corals in the reef-coral regions of the South China Sea. Beijing: China Science and Technology Press, 1991.
- [34] Simpson E H. Measurement of diversity. *Nature*, 1949, 163: 688.
- [35] Shannon C E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27: 379—423.
- [36] Margalef R. Information theory in ecology. *General Systems*, 1958, 3: 36—71.
- [37] Pielou E C. Ecological diversity. New York: John Wiley, 1975.
- [38] Spalding M D, Ravilious C, Green E P. World atlas of coral reefs. Berkeley: University of California Press, 2001.
- [39] Guilcher A. Coral reef geomorphology. Chichester: John Wiley & Sons, 1988.
- [40] Ditlev H. Zonation of corals (Scleractinia: Coelenterata) on intertidal reef flats at Ko Phuket, Eastern Indian Ocean. *Marine Biology*, 1978, 47 (1): 29—39.
- [41] Dollar S J. Wave stress and coral community structure in Hawaii. *Coral Reefs*, 1982, 1(2): 71—81.
- [42] Loya Y. Community structure and species diversity of hermatypic corals at Eilat, Red Sea *Marine Biology*, 1972, 13(2): 100—123.
- [43] Fricke H, Meischner D. Depth limits of Bermudan scleractinian corals: a submersible survey. *Marine Biology*, 1985, 88(2): 175—187.
- [44] Liu R Y. The effects of human activities on benthos diversity. In: Center for Coastal Ocean Sciences and Technology, Zhongshan University (ed.). Symposium on Coastal Ocean Resources and Environment '97, Proceedings of SCORE '97, Hong Kong, 1997. Hong Kong: Center for Coastal and Atmospheric Research. The Hong Kong University of Science and Technology, 1998. 39—46.
- [45] Xie Y K, Lin B P, Li Q X. Mollusca in the Luhuitou of Hainan Island and adjacent shore. *Acta Zoologica Sinica*. 1981, 27(4): 384—387.
- [46] Zhang Q M. Status monitoring and management strategy research of Luhuitou fringing reef of the Sanya Reserve. In: UNEP, Monitoring Coral Reefs for Better Management Schemes; UNEP EAS/RCU Small Grant Fund Programme 2002—2003. Bangkok: UNEP, 2004. 241—258.
- [47] Zhang Q M, Shi Q, Chen G, *et al.* Status monitoring and health assessment of Luhuitou fringing reef of Sanya, Hainan, China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Supp II): 81—88.
- [48] Zhao M X, Yu K F, Zhang Q M. The evolution and its environmental significance of coral diversity on Luhuitou fringing reef, Sanya. *Marine Environmental Science*, 2008.
- [49] Yu K F, Zhao J X, Liu T S, *et al.* High-frequency winter cooling and coral mortality during the Holocene climatic optimum. *Earth and Planetary Science letters*, 2004, 224(1-2): 143—155.
- [50] Zhang Q M. Status of tropical biological coasts of China: implications on ecosystem restoration and reconstruction. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(4): 454—464.

参考文献:

- [15] 高志文. 海南岛鹿回头珊瑚岸礁沉积物的沉积特征. 南海海洋科学集刊, 第9集. 北京: 科学出版社, 1987. 43~53.
- [16] 祝仲蓉, 黄金森. 海南岛三亚市鹿回头连岛坝碳酸盐沉积的岩石学特征. 南海海洋科学集刊, 第9集, 北京: 科学出版社, 1987. 233~240.
- [17] 蔡爱智, 李星元. 海南岛南岸珊瑚礁的若干特点. 海洋与湖沼, 1964, 6(2): 205~216.
- [18] 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, 10(2): 25~43.
- [20] 张乔民, 余克服, 施祺. 海南珊瑚礁的海岸生物地貌过程研究. 海洋地质动态, 2003, 19(11): 1~4, 30.
- [21] 邹仁林, 宋善文, 马江虎. 海南岛浅水造礁石珊瑚. 北京: 科学出版社, 1975.
- [22] 颜克松. 石珊瑚. 生物学通报, 1956, (2): 23~27.
- [23] 纳乌莫夫 B, 颜克松, 黄明显. 海南岛珊瑚礁的主要类型. 海洋与湖沼, 1960, 3(3): 157~176.
- [24] 邹仁林, 马江虎, 宋善文. 海南岛珊瑚礁垂直分带的初步研究. 海洋与湖沼, 1966, 8(2): 153~160.
- [25] 于登攀, 邹仁林. 鹿回头造礁石珊瑚群落多样性的现状及动态. 生态学报, 1996, 16(6): 559~564.
- [26] 于登攀, 邹仁林. 鹿回头岸礁造礁石珊瑚物种多样性的研究. 生态学报, 1996, 16(5): 469~475.
- [27] 张乔民. 三亚鹿回头珊瑚礁生物多样性面临威胁. 科学新闻, 2003, (9): 24~25.
- [28] 吴小根, 金波, 卫建飞, 等. 三亚港近期淤积变化及其原因分析. 海洋通报, 1998, 17(5): 51~57.
- [31] 邹仁林. 中国动物志——造礁石珊瑚. 北京: 科学出版社, 2001.
- [32] 陈乃观, 蔡莉斯, 梦海莉, 等. 香港石珊瑚图鉴. 香港: 渔农自然护理署, 2005.
- [33] 聂宝符, 梁美桃, 朱袁智, 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.
- [44] 刘瑞玉. 人类活动对底栖生物多样性的影响. 见: 中山大学近岸海洋科学与技术研究中心编辑. 97 海岸海洋资源与环境研讨会论文集. 香港: 香港科技大学理学院及海岸与大气研究中心出版, 1998. 39~46.
- [45] 谢玉坎, 林碧萍, 李庆欣. 海南岛鹿回头及附近的贝类. 动物学报, 1981, 27(4): 384~387.
- [50] 张乔民. 我国热带生物海岸的现状与生态系统的修复与重建. 海洋与湖沼, 2001, 32(4): 454~464.