

DOI: 10.5846/stxb202006101515

杨振雄, 张敬怀, 吕向立, 郑琰晶, 姜广甲, 时小军, 陶伟, 李秀芹, 吕意华. 涠洲岛造礁石珊瑚群落变化特征及其环境影响因子. 生态学报, 2021, 41(18): 7168-7179.

Yang Z X, Zhang J H, Lü X L, Zheng Y J, Jiang G J, Shi X J, Tao W, Li X Q, Lü Y H. The ecological succession of scleractinian coral communities and their environmental factors in Weizhou Island. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7168-7179.

涠洲岛造礁石珊瑚群落变化特征及其环境影响因子

杨振雄^{1,2}, 张敬怀^{1,2}, 吕向立^{1,2}, 郑琰晶^{1,2}, 姜广甲^{1,2,3,*}, 时小军^{1,2}, 陶 伟^{1,2},
李秀芹^{1,2}, 吕意华^{1,2}

1 国家海洋局南海环境监测中心, 广州 510300

2 自然资源部南沙珊瑚礁生态系统野外科学观测研究站, 广州 510300

3 广西南海珊瑚礁研究重点实验室(广西大学), 南宁 530004

摘要:以涠洲岛造礁石珊瑚群落为研究对象, 分析其群落物种组成、多样性、Raunkiaer 频度和种间 Spearman 秩相关, 探讨群落组成与水环境因子的相关性, 并结合近 10 年来涠洲岛造礁石珊瑚变化情况, 找出涠洲岛造礁石珊瑚群落的主导影响因素。结果表明: (1) 近 10 年来涠洲岛造礁石珊瑚覆盖率显著降低, 珊瑚形态组成趋于块状化, 尽管珊瑚群落多样性较高, 但群落分布较松散, 群落结构较不稳定, 部分优势种间竞争较激烈。 (2) 悬浮物含量是影响石珊瑚群落最显著的环境因子。石珊瑚优势种群在不同水深中分布差异显著, 泥沙覆盖率、营养盐对不同石珊瑚种群影响差异较大, 大型海藻覆盖率在局部区域对优势珊瑚形成较强的竞争关系。 (3) 营养盐和泥沙沉积物的增加与涠洲岛近海养殖业及生活排污、海岸工程及海岸侵蚀密切相关。

关键词: 涠洲岛; 造礁珊瑚; 种群结构; 环境因子

The ecological succession of scleractinian coral communities and their environmental factors in Weizhou Island

YANG Zhenxiong^{1,2}, ZHANG Jinghui^{1,2}, LÜ Xiangli^{1,2}, ZHENG Yanjing^{1,2}, JIANG Guangjia^{1,2,3,*},
SHI Xiaojun^{1,2}, TAO Wei^{1,2}, LI Xiuqin^{1,2}, LÜ Yihua^{1,2}

1 South China Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China

2 Nansha Islands Coral Reef Ecosystem Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Guangzhou 510300, China

3 Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract: For the Weizhou Island, which is geographically independent, the human-induced influence is more significant to the rapid degradation of its coral reef ecosystems. the identification of dominant influencing factors on different temporal scales remains a challenge for the local aquatic environment. It is, therefore, essential to explore the ecological status of the coral reefs and the potential threats in Weizhou Island. The primary aim of this study is to explore the dominant influencing factors for the degradation of the scleractinian coral community in Weizhou Island within the 10 years of 2009—2019. To this end, the species composition, diversity, Raunkiaer frequency and Spearman correlation of the community were analyzed. The correlations between the community composition and environmental variations of water were further discussed. The identification of the dominant factors was performed through analyzing the ecological changes of scleractinian coral

基金项目:广西南海珊瑚礁研究重点实验室基金项目(GXLSRSCS2020002);国家自然科学基金项目(41776172);全国珊瑚礁生态现状调查专项(2019-2020)

收稿日期:2020-06-10; 修订日期:2021-06-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gjjiang2011@gmail.com

community in Weizhou Island over 10 years. Results demonstrated that, the coverage of scleractinian coral in the study area significantly decreased, with the changes of the coral reef in morphology, e.g., block. It was noted that, the diversity of the scleractinian coral community was relatively high, but scarred distribution in space of the coral community was observed. Furthermore, the ecological structure was unstable due to the intense competition among some dominant species. It was believed that the high loads of suspended sediments were the most important factor to affect the ecological characteristics of the scleractiniane coral community in Weizhou Island. The spatial distribution of the dominant species was highly related to the water depths, whilst the sediment coverages and nutrient sources significantly affected the diversity of coral populations. Further, relatively strong competition between local large algae and the dominant species of coral reefs was observed. We also observed that the environmental factors, nutrients and sediments, were closely correlated with the aquaculture, human sewage, coastal engineering, coastal erosion, etc.

Key Words: Weizhou Island; scleractinian coral; species composition; environmental factors

涠洲岛不仅被认为是南海珊瑚为适应高温迁移的潜在避难所,还是研究人类活动影响珊瑚礁生态的理想实验室^[1-2]。近年来梁文等^[3-5]、黄晖等^[6]、王欣等^[7]、陈天然等^[8]等学者从不同角度对涠洲岛进行了珊瑚礁生态调查,并研究了石珊瑚群落生态变化的影响因子。例如,黄晖等^[6]2005年6个站位的调查发现石珊瑚死亡率高,推断涠洲岛珊瑚遭到了长期的、特别是近两年的持续破坏,并认为原因是人为因素导致的海水水质变差、沉积物增多,以及海水温度异常和人为直接破坏或破坏性的捕鱼作业。梁文等^[3]2007、2008年6个站位的调查发现涠洲岛受1998年的“厄尔尼诺”引起的全球性极高温事件、2008年1—2月极低温事件及不合理人类活动胁迫影响较大。陈天然等^[8]通过测定滨珊瑚骨骼生长率变化验证了余克服等^[9]提出的夏季异常高SST的持续上升可能会使珊瑚生长处于非常敏感边缘的推论,证实了涠洲岛珊瑚会对气候变暖和极端事件进行响应,并指出涠洲岛的人类活动胁迫降低了珊瑚耐受气候变化的阈值,降低了其适应气候变化和自我进化的能力。Yu等^[1]假设涠洲岛是一个理想的珊瑚避难所(珊瑚礁具有复杂形态结构、珊瑚覆盖率高、种类丰富和复原能力强的特点),通过2015年的6个站位的现状调查进行评估,结果发现涠洲岛珊瑚礁在逐渐加强的人类活动影响下快速退化,其作为潜在珊瑚避难所的功能性在减弱。全球性变暖、近岸海域富营养化和草食性动物的减少常被认为是珊瑚礁退化的主要原因^[10]。虽然与全球气候相比,人类活动的影响范围较小,但对于地理单元小且相对独立的涠洲岛来说,其环境承载能力有限,人类活动干扰超过了珊瑚礁生态系统的容忍限度,珊瑚礁生态系统会发生退化甚至崩溃^[8]。因此,研究涠洲岛珊瑚礁现状及其面临的威胁对于深入研究区域珊瑚礁生态特征及其影响因素具有重要的意义。

尽管涠洲岛珊瑚礁历史调查资料较多,但对于全面评价涠洲岛珊瑚群落特征和演替规律还需要更多的现场数据支撑。现有的生态调查多以分析珊瑚礁区群落特征为主,对石珊瑚的群落结构特征、优势种群及其与环境因子关系的定量分析相对较少,而人类活动影响多以定性描述为主,缺乏系统的调查和定量的评价^[2]。可用于量化趋势评价的数据较少,历史资料还不能完全反映当前涠洲岛珊瑚礁生态资源及其面临的威胁。同时,很多学者认为涠洲岛珊瑚退化是过度捕捞、污染、物理损伤(踏踩、抛锚、水下工程等)和大尺度环境变化(如气候异常)等原因共同造成的^[2],但其不同时期的主导影响因素需要进一步研究。

为摸清我国珊瑚礁资源空间分布格局和生态状况,自然资源部2019年启动了包括涠洲岛在内的全国珊瑚礁基线调查,在涠洲岛海域布设了15个站位45条断面,对涠洲岛珊瑚礁资源进行生态精细化调查。基于涠洲岛珊瑚礁基线调查数据,分析石珊瑚种群生态特征及其与环境因子的相关性,并结合历史数据,探求10年内(2009—2019年)涠洲岛珊瑚退化的主导因素,为涠洲岛珊瑚礁资源开发、保护和管理提供基础数据及技术支撑。

1 研究方法

1.1 研究区域和调查方法

涠洲岛(109°00′—109°15′E, 21°00′—21°10′N)位于广西壮族自治区南部,北部湾海域中部(图1)。调查日期为2019年5月26日—6月1日。采用截线样带调查法(Line intercept transect),以500—1000 m/条间距,布设垂直于岸线的共计15个站位45条样带(每个站位布设3条样带,每条样带50 m),水深范围为2—12 m。拍摄水下样线录像和下水特写照片,提取样线底质类型、石珊瑚覆盖率、石珊瑚属种组成、硬珊瑚补充量、大型藻类覆盖率、泥沙覆盖率等数据。石珊瑚鉴定通过分析水下特写照片和样品细微结构。同步开展水温、盐度、溶解氧、悬浮物、无机氮、活性磷酸盐等环境因子调查,样品采集和分析参照《海洋监测规范》(GB17378—2007)、《海洋调查规范》(GB/T12763—2007)。

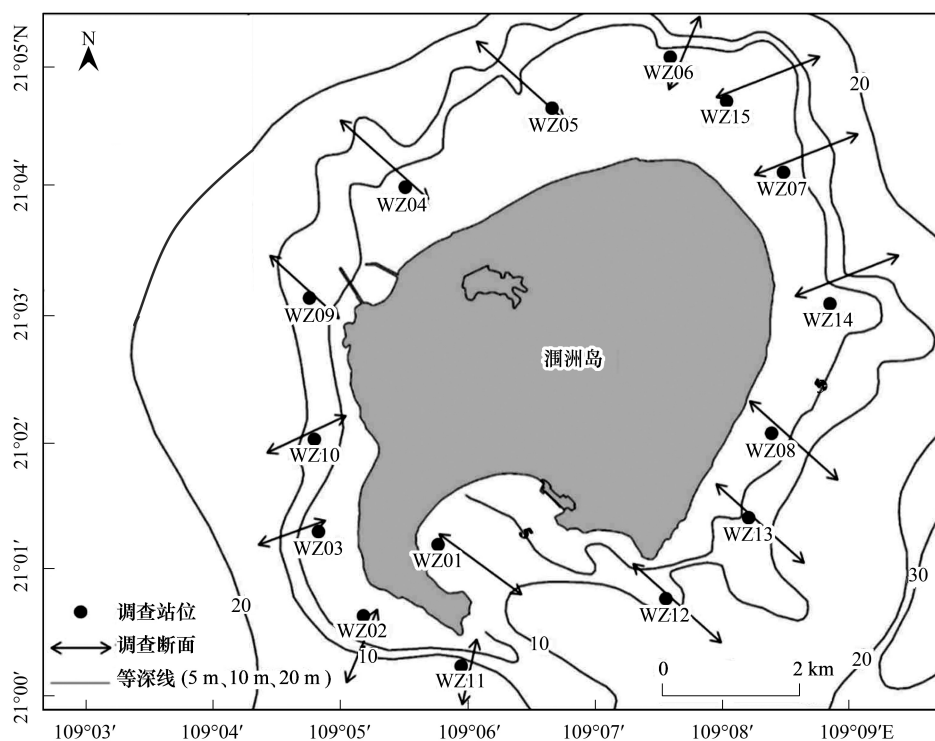


图1 调查站位示意图

Fig.1 Skeeth map of sampling stations

1.2 数据分析

造礁石珊瑚的优势属种选取采用重要值法^[1-2]。同时,为全面评价石珊瑚与环境因子间的关系,本文还采用以下的标准选取参与环境因子分析的石珊瑚作为优势种,即:该物种在各样点出现的频度 $\geq 12.5\%$,且在至少一个样点的平均覆盖率 $\geq 1\%$ (阈值确定的标准为各物种频度和平均覆盖率的排序中值)。采用 Shannon-Wiener 指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)和 Simpson 多样性指数(d)分析珊瑚群落多样性特征^[11]。使用 Raunkiaer 频度法分析珊瑚群落稳定性^[12],分级标准为:A 为频度 1%—20%的比例,B 为频度 21%—40%的比例,C 为频度 41%—60%的比例,D 为频度 61%—80%的比例,E 为频度 81%—100%的比例。通常样方内各频度等级种群占总物种数比例关系为 $A > B > C \geq D \geq E$ 级。Raunkiaer 频度直方图作为群落成熟度和稳定性的重要指标,其越接近反 J 型(即 $A/E < 1$,比值越低),表示群落越成熟稳定,越趋于顶级阶段^[13]。计算主要优势种 Spearman 秩相关系数及显著性,分析珊瑚种间关系^[14]。

采用去趋势对应分析方法(DCA)分析珊瑚群落在不同区域的相互关系;采用聚类分析(Cluster)初步评

估不同环境因子中各珊瑚群落分布的分类关系;采用主成分分析法(PCA)识别影响站位分组的主要环境因子;鉴于珊瑚生物群落在水下鉴定可能有一定误差,本文对石珊瑚优势属、优势种与环境因子的关系进行分析;使用 DCA 来确定生物数据适用于线性模型还是单峰型模型(若 DCA 中所有排序轴的值均小于 3,则选择线性模型),若为线性模型则使用冗余分析 RDA 获得珊瑚群落与环境变量的关系(利用 CANOCO 软件自动向前选择程序对环境因子进行逐一筛选,并利用 Monte Carlo 检测,其结果可判断第二轴的解释量是否影响第一轴解释量的显著性),挑选出对物种分布显著的环境因子($P < 0.05$);使用多元线性回归(Linear Regression)拟合群落生态特征值与环境因子的回归方程。物种矩阵经过 $\lg(x+1)$ 转换,环境数据除 pH 外进行 $\lg(x+1)$ 转换。数据分析使用 CANOCO 4.5、SPSS 16、PRIMER 5.0 等软件。

2 结果与分析

2.1 石珊瑚种群结构特征

研究表明,涠洲岛造礁石珊瑚有 9 科 22 属 42 种,以裸肋珊瑚科种类最多(60.5%)。总体来说,石珊瑚覆盖率为 3.8%—19.8%,平均为 10.5%,西南、西北和东南部覆盖率较高(图 2)。石珊瑚主要分布在 5—10 m 的水深范围内,珊瑚覆盖率在 4.8%—42.8%之间(平均值:15.3%); < 5 m 和 > 10 m 的水深区域珊瑚覆盖率相差不大,范围分别为在 2.0%—25.8%(平均值:8.4%)和 0.6%—23.0%(平均值:8.7%)。石珊瑚主要优势属为角蜂巢珊瑚属(*Favite* sp.)、滨珊瑚属(*Porite* sp.)、角孔珊瑚属(*Goniopora* sp.)和陀螺珊瑚属(*Turbinaria* sp.)等,形态以团块状为主。主要优势种为澄黄滨珊瑚(*Porites lutea*)、秘密角蜂巢珊瑚(*Favites abdita*)、斯氏角孔珊瑚(*Goniopora stutchburyi*)、海孔角蜂巢珊瑚(*Favites halicora*)(表 1),其中澄黄滨珊瑚、秘密角蜂巢珊瑚的重要值最高,其属级重要值百分比分别为 9.7%和 8.5%。

多样性指数 H' 范围为 2.64—4.00,均值为 3.30,有 2/3 的海域 H' 大于 3,在涠洲岛西南、东南和东北海域较高,而在南湾(人类活跃区,WZ01)和西部(风浪作用强烈及海岸与海底侵蚀活跃区,WZ09—WZ10)附近海

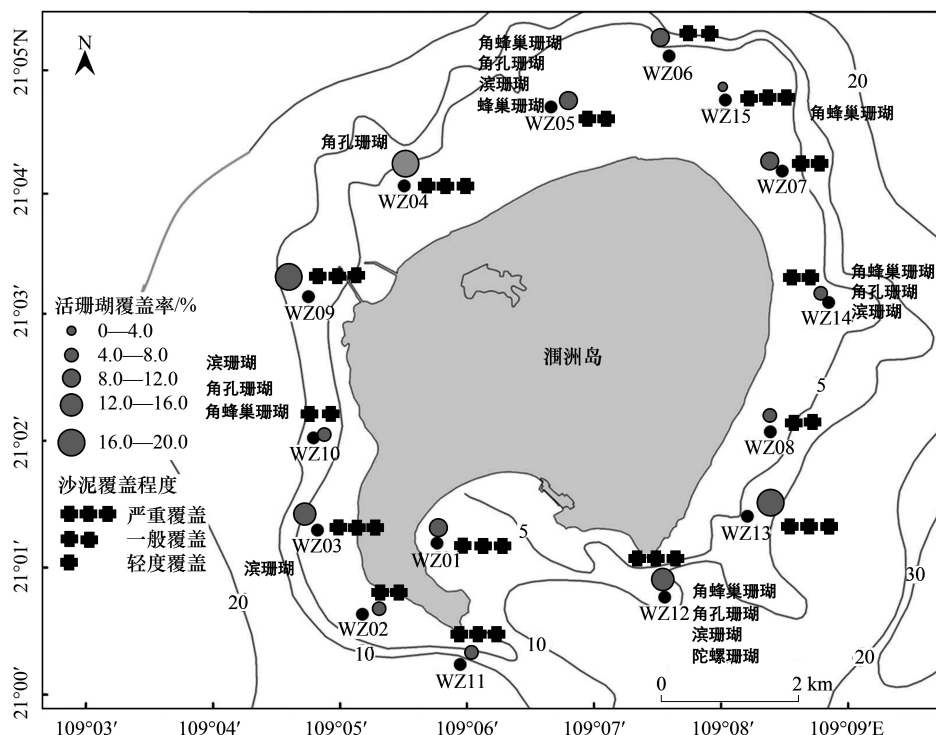


图 2 造礁石珊瑚覆盖度、主要珊瑚种群及泥沙覆盖分布

Fig.2 Distribution of scleractinian coral coverage, major coral community, and sediment coverage

域较低。主要石珊瑚优势种 Spearman 秩相关分析结果(图 3)显示,正相关种对数略多于负相关,正相关对数占总对数的 50.5%,负相关对数占 48.4%,正负关联比为 1.05,极显著或显著正相关、负相关的占 15.8%,说明总体上石珊瑚群落种间联结性较松散,仅部分物种之间相关性较强,如秘密角蜂巢珊瑚与海孔角蜂巢珊瑚显著正相关,澄黄滨珊瑚与斯氏角孔珊瑚极显著正相关等。

表 1 涠洲岛不同水深范围内的主要珊瑚礁优势种

Table 1 The dominant species of coral reefs in different water depths of Weizhou Island

水深 Depth/m	科别 Family name	中文名 Chinese name	拉丁名 Latin name	重要值 Important value	重要值占比 Proportion of important values
涠洲岛	滨珊瑚科	澄黄滨珊瑚	<i>Porites lutea</i>	1.202	0.097
涠洲岛	裸肋珊瑚科	秘密角蜂巢珊瑚	<i>Favites abdita</i>	1.058	0.085
涠洲岛	滨珊瑚科	斯氏角孔珊瑚	<i>Goniopora stutchburyi</i>	0.965	0.078
涠洲岛	裸肋珊瑚科	海孔角蜂巢珊瑚	<i>Favites halicora</i>	0.728	0.059
<5	滨珊瑚科	澄黄滨珊瑚	<i>Porites lutea</i>	1.21	0.109
<5	菌珊瑚科	牡丹珊瑚 sp.	<i>Pavona</i> sp.	1.182	0.106
<5	滨珊瑚科	斯氏角孔珊瑚	<i>Goniopora stutchburyi</i>	0.664	0.06
<5	裸肋珊瑚科	五边角蜂巢珊瑚	<i>Favites pentagona</i>	0.63	0.057
<5	裸肋珊瑚科	海孔角蜂巢珊瑚	<i>Favites halicora</i>	0.599	0.054
5—10	滨珊瑚科	澄黄滨珊瑚	<i>Porites lutea</i>	1.242	0.111
5—10	菌珊瑚科	牡丹珊瑚 sp.	<i>Pavona</i> sp.	1.149	0.103
5—10	滨珊瑚科	斯氏角孔珊瑚	<i>Goniopora stutchburyi</i>	1.124	0.101
5—10	裸肋珊瑚科	海孔角蜂巢珊瑚	<i>Favites halicora</i>	1.09	0.098
5—10	木珊瑚科	盾形陀螺珊瑚	<i>Turbinaria peltata</i>	0.724	0.065
>10	滨珊瑚科	澄黄滨珊瑚	<i>Porites lutea</i>	1.188	0.107
>10	滨珊瑚科	斯氏角孔珊瑚	<i>Goniopora stutchburyi</i>	1.122	0.101
>10	菌珊瑚科	牡丹珊瑚 sp.	<i>Pavona</i> sp.	0.743	0.067

2.2 石珊瑚群落稳定性、群落分布及其环境分组特征

Raunkiaer 频度分析结果(图 4)表明, $A > B > C \geq D > E$, A 级所占比例最高, 48.2%; B 级次之, 26.8%; C 级为 10.7%, D 级为 8.9%, E 级所占的比例最低, 为 5.4%。群落的 Raunkiaer 标准频度直方图不呈反 J 型, 且 A 级和 E 级的比值为 8.9, 说明珊瑚群落受到严重干扰而处于不稳定或不成熟状态。

对优势石珊瑚群落(统计到属)进行 DCA 排序(图 5), 发现 DCA 的第一排序轴值长度为 1.733, 且所有排序轴的值均不大于 1.733。滨珊瑚属(第一优势类群)和扁脑珊瑚属卡方距离较近, 表明具有较相似的生长环境条件, 二者具有潜在的竞争关系, 滨珊瑚属和扁脑珊瑚主要分布在区域 II (WZ01、WZ02、WZ03 和 WZ10), 即在涠洲岛的东西部, 而角蜂巢珊瑚属(第二优势类群)主要分布在区域 I (WZ04、WZ05), 即涠洲岛北部。

Cluster 分析结果(图 6)表明, 涠洲岛石珊瑚礁区生物群落生境可主要分为两类: 一类位于南湾湾内的 WZ01 站, 即受人类活动影响最大的生境; 另一类则在南湾湾内之外(除 WZ01 站外)的涠洲岛其他海域生境。利用 PCA 对各个站位进行分组, 以分析站位中起主要作用的环境因子。结果表明(图 6, 第一第二主成分共解释了总变异的 99.8%) 环境因子主要可以分为 3 组: 组 1 包括站位 WZ03—WZ06、WZ08、WZ10、WZ11、WZ14, 涵盖了 53.3% 的区域。组 2 包括站位 WZ09、WZ12 和 WZ13。组 3 为站位 WZ01。各组的结果与聚类分析 Cluster 相似, 其中, 组 1 与营养盐、大型海藻覆盖率、透明度等相关性最高。组 3 位于南湾, 与其他站位显著差异, 且与营养盐负相关最高。

2.3 珊瑚种群与环境因子的关系

对珊瑚群落生态特征值与主要环境因子(表 2)进行相关性和多元线性回归分析, 结果表明(表 3): 珊瑚

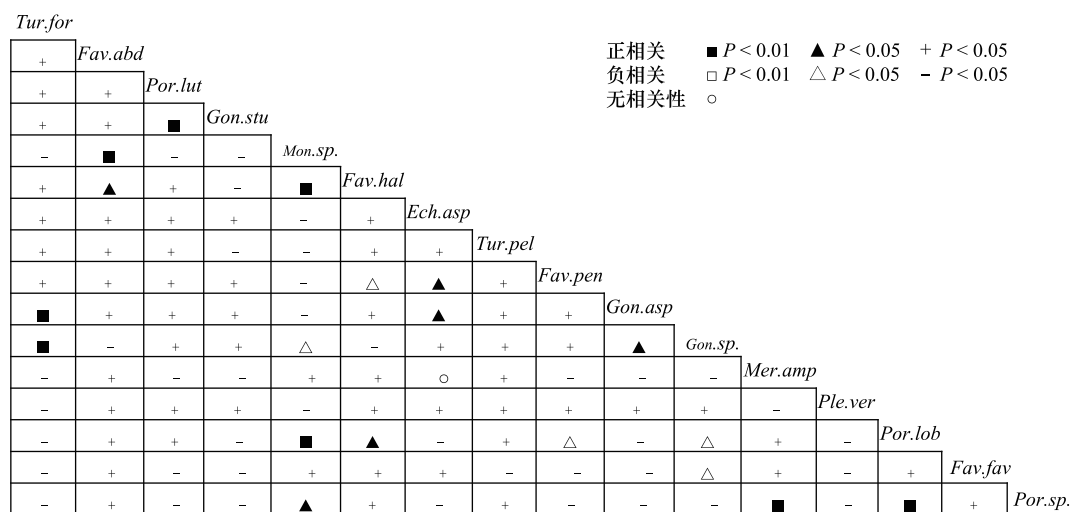


图3 珊瑚主要优势种对的 Spearman 秩相关分析

Fig.3 Spearman rank correlation analysis of main species in coral communities

Por.lut: 澄黄滨珊瑚 *Porites lutea*; *Fav.abd*: 秘密角蜂巢珊瑚 *Favites abdita*; *Gon.stu*: 斯氏角孔珊瑚 *Goniopora stutchburyi*; *Fav.hal*: 海孔角蜂巢珊瑚 *Favites halicora*; *Tur.pel*: 盾形陀螺珊瑚 *Turbinaria peltata*; *Fav.pen*: 五角角蜂巢珊瑚 *Favites pentagona*; *Mer.amp*: 阔裸肋珊瑚 *Merulina ampliata*; *Ple.ver*: 多孔同星珊瑚 *Plesiastrea versipora*; *Por.lob*: 团块滨珊瑚 *Porites lobata*; *Mon.sp.*: 蔷薇珊瑚 sp. *Montipora* sp.; *Ech.asp*: 粗糙刺叶珊瑚 *Echinophyllia aspera*; *Gon.asp*: 粗糙菊花珊瑚 *Goniastrea aspera*; *Gon.sp.*: 角孔珊瑚 sp. *Goniopora* sp.; *Fav.fav*: 黄麻蜂巢珊瑚 *Favia fava*; *Por.sp.*: 滨珊瑚 sp. *Porites* sp.

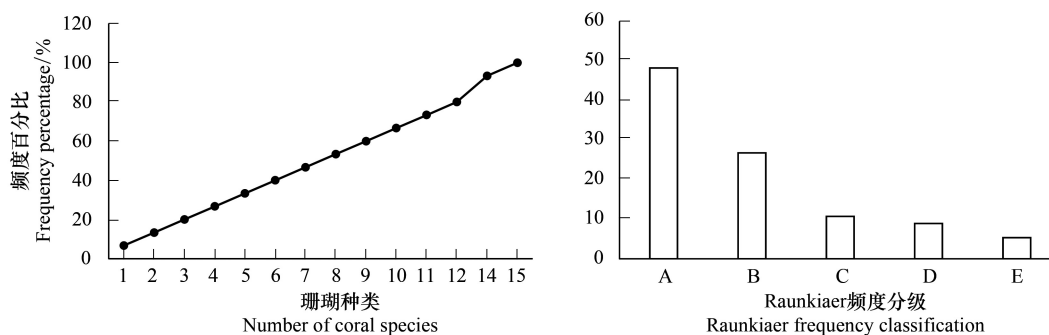


图4 珊瑚分布频率和珊瑚群落物种 Raunkiaer 标准频率分级

Fig.4 Frequency distribution & Standard frequency histogram of coral communities

A 为频率 1%—20% 的比例, B 为频率 21%—40% 的比例, C 为频率 41%—60% 的比例, D 为频率 61%—80% 的比例, E 为频率 81%—100% 的比例

覆盖率与水体悬浮物含量 ($-0.53, P < 0.05$) 显著负相关, 与水深 ($0.53, P < 0.05$) 显著正相关; 珊瑚种类数与铵盐 ($0.60, P < 0.05$) 和透明度 ($0.58, P < 0.05$) 显著正相关, 与泥沙覆盖率 ($-0.62, P < 0.05$) 显著负相关; 珊瑚多样性指数与珊瑚种类数 ($0.87, P < 0.01$) 极显著正相关, 也与铵盐 ($0.59, P < 0.05$) 显著正相关, 与泥沙覆盖率 ($-0.52, P < 0.05$) 显著负相关; 硬珊瑚补充量与石油类 ($-0.56, P < 0.05$) 显著负相关。

利用 RDA 分析物种与环境因子的关系 (DCA 各排序轴均小于 3), 发现对石珊瑚优势属经 Monte Carlo 检测 (Number of permutations 排序次数 499), 筛选出 7 个主要环境因子 (解释量比例为 73.8%), 为水深、悬浮物含量、无机氮、叶绿素、温度、pH、盐度、化学需氧量, 其中为水深、悬浮物含量是显著影响因子 ($P < 0.05$); 对珊瑚优势种经 Monte Carlo 检测 (Number of permutations 排序次数 499), 筛选出 8 个主要环境因子 (解释量比例为 75.8%), 为水深、悬浮物含量、pH、无机氮、磷酸盐、叶绿素、泥沙覆盖率、大型藻类覆盖率, 其中为水深、悬

浮物含量是显著影响因子 ($P < 0.05$)。

石珊瑚优势属及其优势种对海洋环境的需求基本相似(图7),均受水深、悬浮物含量、无机氮浓度的影响较大,特别是悬浮物含量与大部分石珊瑚显著负相关。主要优势属角蜂巢属及优势种海孔角蜂巢珊瑚、秘密角蜂巢珊瑚与水深显著正相关,与叶绿素 a、无机氮正相关,但与泥沙覆盖率、pH 显著负相关,说明角蜂巢珊瑚属对泥沙覆盖较差的耐受力;滨珊瑚属和角孔珊瑚属及其优势种澄黄滨珊瑚、斯氏角孔珊瑚与泥沙覆盖率相关性较低,表明它们对泥沙覆盖有一定的耐受力,但与大型海藻覆盖率(主要为匍扇藻(*Lobophora variegata*))具有显著的负相关关系。涠洲岛大型海藻覆盖率范围为 0.8%—39.3%,均值为 6.8%,仅在 WZ05 (16% >> 11%)、WZ10 站 (39.3% >> 5.2%) 显著高于珊瑚覆盖率,反映了局部区域大型海藻与珊瑚可能存在较强的竞争关系。

3 讨论

3.1 涠洲岛石珊瑚群落变化趋势

历史数据分析表明^[1-7],近 30 年涠洲岛平均石珊瑚覆盖率呈现下降趋势(图 8),由 20 世纪 80—90 年代的 60% 以上下降到目前的 10% 左右。原珊瑚种群主要分布区(西南部、东南部和北部)退化严重,尤以西南部(涠洲岛主要人类活动区,特别是南湾)变化最为明显,由 1991 年的 70% 下降至 2019 年的 9.6%。石珊瑚优势类群发生了较大的变化,块状珊瑚逐渐取代分枝状珊瑚成为优势类群,角蜂巢珊瑚、滨珊瑚、角孔珊瑚等是近年来的主要优势群落^[1-2]。实际上,珊瑚形态在一定程度上反应生态适应性^[15-16],生长迅速、空间竞争能力强、抵抗干扰能力弱的分枝形态的造礁石珊瑚群更容易遭受严重破坏,而生长缓慢、生态幅宽广、对栖息环境

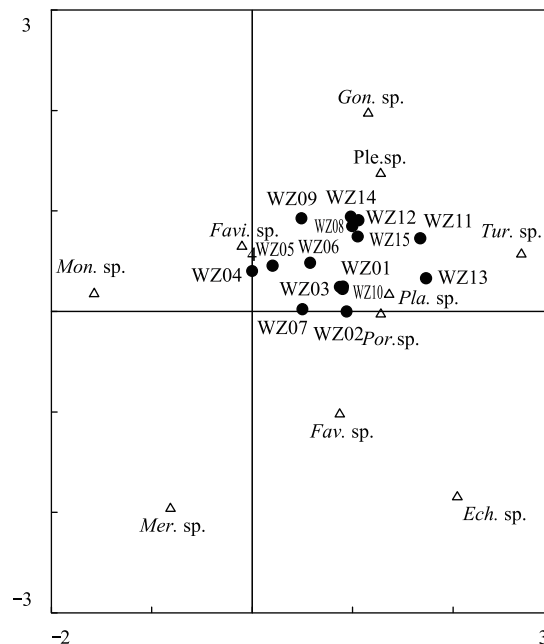


图 5 主要珊瑚种群 DCA 分布图

Fig.5 The DCA distribution of major coral community

三角形表珊瑚优势属;Favi.sp.:角蜂巢珊瑚属 *Favites* sp.;Por.sp.:滨珊瑚属 *Porites* sp.;Gon.sp.:角孔珊瑚属 *Goniopora* sp.;Tur.sp.:陀螺珊瑚属 *Turbinaria* sp.;Fav.sp.:蜂巢(盘星)珊瑚属 *Favia* sp.;Pla.sp.:扁脑珊瑚属 *Platygyra* sp.

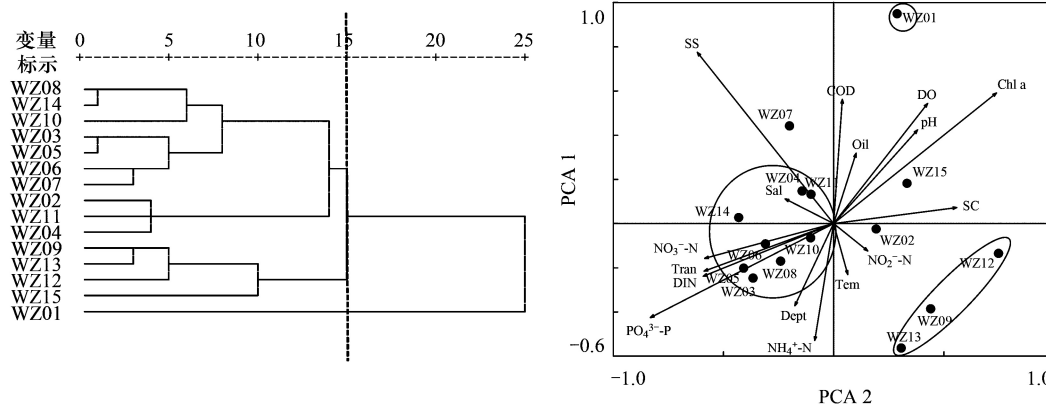


图 6 珊瑚群落调查站位分布聚类和环境因子主成分分析

Fig.6 Distribution clustering & PCA of the environmental factors in coral communities

箭头表环境因子,圆圈为站位号;Dept:水深 Depth;Tran:透明度 Transparency;Tem:温度 Temperature;Sal:盐度 Salinity;COD:化学需氧量 Chemical oxygen demand;SS:悬浮物含量 Suspended solids content;Oil:石油类 Oils;DIN:无机氮 Inorganic nitrogen;Chla:叶绿素 a Chlorophyll-a;SC:泥沙覆盖率 Sediment coverage;AC:大型海藻覆盖率 Coverage of macroalgae

要求不高的团块状珊瑚群受到的破坏较小,更适应生长。尽管活珊瑚覆盖率递减和优势群落更替趋势显著,Yu 等^[1]在 2015 年发现在涠洲岛珊瑚礁区仍有大量的硬珊瑚补充量,本研究也发现在涠洲岛西南(W3 站附近,补充量为 6.51 个/m²)、北部(WZ05 站附近,补充量为 5.80 个/m²)海域仍有较多的硬珊瑚补充量,表明涠洲岛珊瑚礁在局部区域仍有较大的恢复潜力。

表 2 涠洲岛海域主要海洋环境因子
Table 2 The main marine environmental factors in waters of Weizhou Island

项目 Items	温度/℃ Temperature	盐度 saility	pH	DO/ (mg/L)	COD/ (mg/L)	悬浮物/(mg/L) Suspended solids content	透明度/m Transparency
范围 Range	28.75—29.40	31.65—32.51	8.15—8.28	5.10—6.76	0.17—0.65	1.20—11.20	1.90—6.30
均值 Average	29.12	32.08	8.21	5.85	0.35	5.27	4.09
项目 Items	油类/(mg/L) Oils	NO ₃ ⁻ -N/ (μmol/L)	NO ₂ ⁻ -N/ (μmol/L)	NH ₄ ⁺ -N/ (μmol/L)	DIN/ (μmol/L)	PO ₄ ³⁻ -P/ (μmol/L)	Chl a/ (μg/L)
范围 Range	1.20—11.20	4.39—14.39	0.40—0.86	1.73—1.09	6.98—16.42	0.05—0.13	0.64—5.91
均值 Average	0.01	9.26	0.63	1.73	11.61	0.09	2.20

DO:溶解氧 Dissolved oxygen;COD:化学需氧量 Chemical oxygen demand;DIN:无机氮 Inorganic nitrogen;Chla:叶绿素 a Chlorophyll-a

表 3 珊瑚群落特征与环境因子形成的回归方程
Table 3 Regression equations between coral community characteristics and the environmental factors

序号 Number	珊瑚群落特征 Characteristics of coral community	与环境因子形成的回归方程 Regression equation with environmental factors
1	珊瑚覆盖率 Coral coverage	$Y = -0.050 \times SS + 0.080$ ($P_{ss} = 0.042, P < 0.05$)
2	珊瑚种类数 Number of coral species	$Y = -0.300 \times SS - 3.579 \times SC + 2.175$ ($P_{ss} = 0.037, P_{sc} = 0.002, P < 0.05$)
3	珊瑚多样性指数 Coral diversity index	$Y = 0.292 \times NH_4-N + 0.225$ ($P_{NH_4-N} = 0.022, P < 0.05$)
4	硬珊瑚补充量 Scleractinian coral supplement	$Y = -75.380 \times Oil + 1.034$ ($P_{oil} = 0.031, P < 0.05$)

SS:悬浮物含量 Suspended solids content;SC:泥沙覆盖率 Sediment coverage;Oil:石油类 Oils

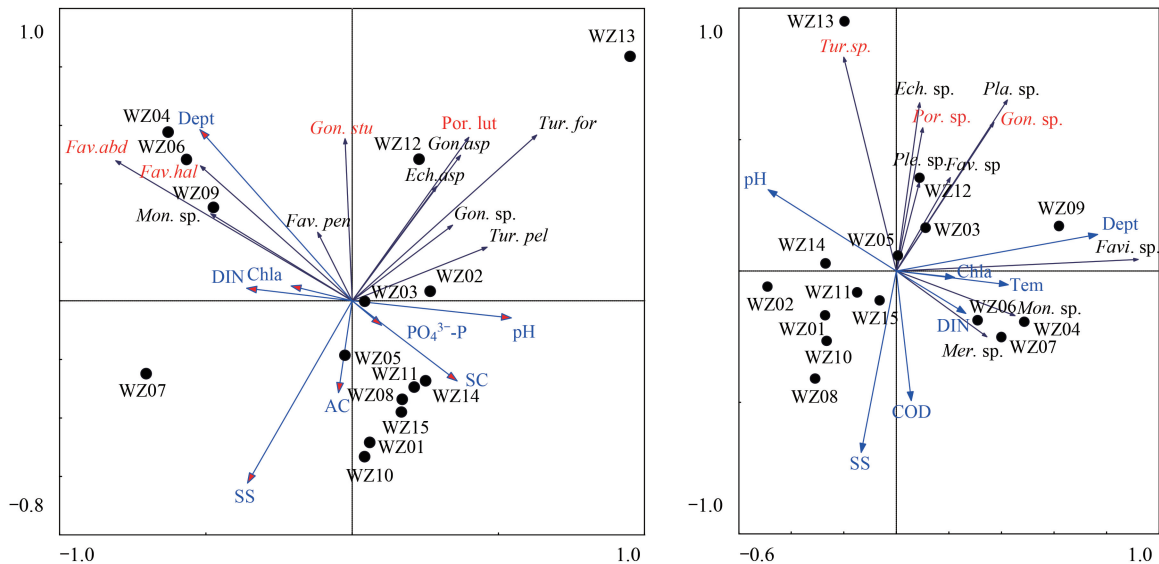


图 7 珊瑚类群、优势珊瑚种与环境因子 RDA 分析

Fig.7 The RDA analysis of coral community, dominant species and environmental factors

黑色细箭头表示珊瑚物种,红色拉丁简写表前几位优势种,蓝色粗箭头表环境因子,黑色圆圈为站位号

研究发现,造礁石珊瑚多样性指数(H')较梁文等^[17](H' 均值为 2.40)高,但多样性分布趋势相似,可能由于本研究以种统计多样性指数,而梁文等^[17]使用的是属级统计多样性指数。尽管分析结果表明涠洲岛的多样性指数较高,但其群落稳定性较差,原因可能是近年来人类活动干扰(如营养盐输入等)扰乱种间生态位互补机制,使得物种多样性对群落稳定性的正效应削弱^[13],如澄黄滨珊瑚与斯氏角孔珊瑚种间联结极显著正相关,显示二者生态位可能互补可共同生长,但耐受能力更强^[18]的澄黄滨珊瑚覆盖度和分布范围明显多于斯氏角孔珊瑚,说明对环境扰动具有较强耐受力的种类在一定程度限制其他种群的生长,使得其他种群竞争力减弱,进而降低整个群落的稳定性。

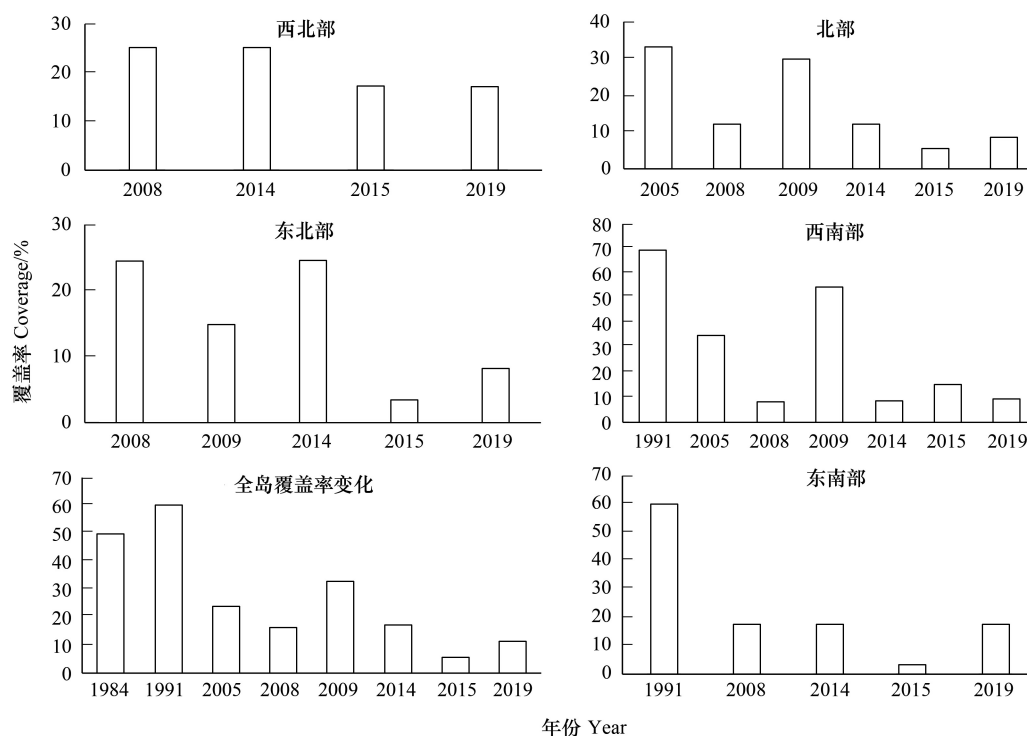


图 8 近 30 年涠洲岛全岛及各区域造礁石珊瑚平均覆盖率变化趋势

Fig.8 The trend of scleractinian coral coverage in all regions of Weizhou Island for nearly 30 years

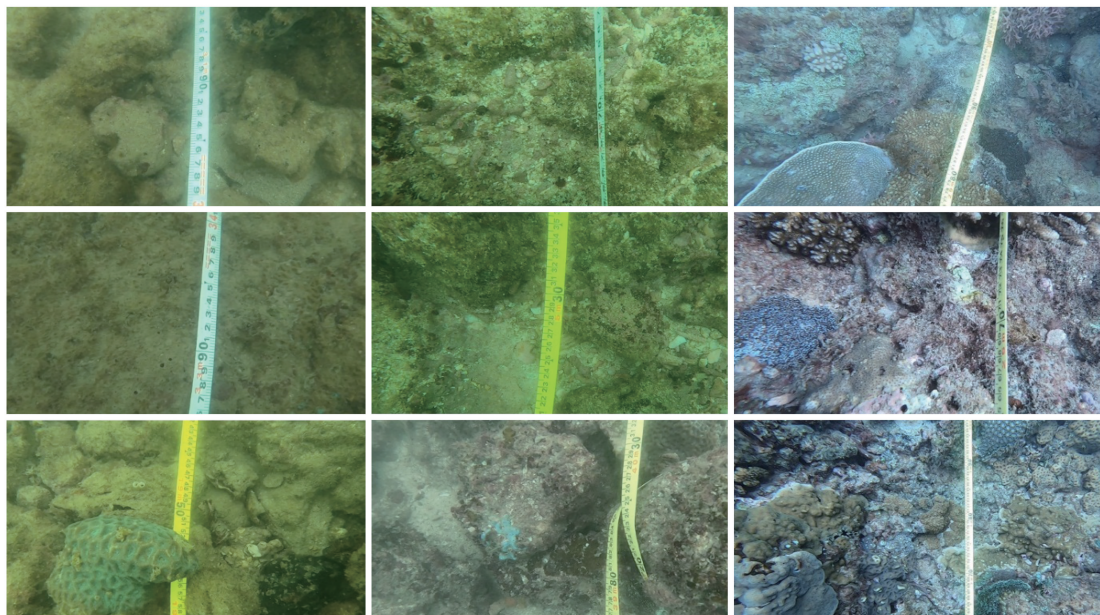
3.2 主要环境因子对涠洲岛石珊瑚群落的影响

3.2.1 悬浮泥沙与泥沙沉降物

涠洲岛海域水体悬浮物均值为 5.1 mg/L,但在南湾(WZ01 站)的悬浮物含量较高(>10 mg/L),与近 10 年涠洲岛悬浮物值变化范围(4.5—21.4 mg/L)一致^[19-20]。虽然整体上悬浮物含量不高,但发现研究区域礁石上泥沙覆盖情况较严重(图 2、图 9)。全岛 53.3%的区域处于严重覆盖,主要是分布在西南、西北和东南近岸海域,又以西南南湾最为显著。

大部分造礁石珊瑚对悬浮沉积物的耐受能力差,悬浮沉积物会在一定程度上抑制珊瑚的生长和发育^[21-22]。例如,统计结果表明泥沙覆盖率与透明度呈极显著负相关(-0.735),与珊瑚多样性(-0.515)、珊瑚种类数(-0.615)显著负相关。同时,珊瑚褪色率、死亡率和覆盖率与水体悬浮物有显著的相关性^[6]。尽管如此,珊瑚对悬浮环境也有一定的适应能力。珊瑚对悬浮沉积物清除能力与珊瑚的种类、形态、生活习性甚至生长方向有很大关系,也受悬浮沉积物本身的数量以及种类影响^[23],如滨珊瑚就能较强耐受悬浮沉积物^[24]。一些珊瑚种类为了适应低辐射、低波长光谱等浑浊环境,共生藻会通过增加叶绿素含量及类囊体膜面积的方式来增加对有限光能的吸收^[25],如盾形陀螺珊瑚生长更偏向于低波长光谱质量^[26],也可通过改变生长形态或骨骼形态适应高悬浮物环境,如柳珊瑚^[27]和圆菊珊瑚 *Montastrea annularis*^[28],说明具有较强耐受能力的团

块状石珊瑚在高悬浮物环境下仍可以普遍生长。



严重: 底质上覆盖较厚的淤泥, 已无法看清淤泥下被覆盖的底质及藻类, 部分珊瑚、大型藻类上覆盖(或悬挂)大量的淤泥、杂质; 海水浑浊, 悬浊物多, 能见度低

一般: 底质上覆盖较薄的淤泥, 可以勉强看出淤泥下的礁石和藻类, 珊瑚和大型藻类上仅有较少的淤泥覆盖(或悬挂); 海水较清, 但依旧存在少量肉眼可见的悬浊物, 能见度相对高

轻度: 底质上覆盖很薄或几乎没有覆盖淤泥, 可以清晰看到裸露的礁石或藻类, 珊瑚和大型藻类上几乎没有的淤泥覆盖(或悬挂), 珊瑚和其他大型生物数量较高; 海水清澈, 几乎没有或仅存在少量肉眼可见的悬浊物, 能见度高

图9 涠洲岛珊瑚礁区泥沙覆盖

Fig.9 The sediment cover in coral reef of Weizhou Island

涠洲岛较高的泥沙覆盖率可能与涠洲海岸风化和侵蚀及北部湾风升流周期性对涠洲岛沿岸影响有关^[29], 特别是春夏季时底层环流搅动所产生的向上覆水补充加上风浪作用造成的紊流扩散, 不仅是泥沙沉积物扩散的动力, 还是营养盐 P 的重要补充来源^[30]。此外, 近年来涠洲岛开展的客货码头、石化栈桥等多项涉海大型工程建设项目, 施工期会产生砂石碎屑、粉尘等入海工程废物。同时, 潜水观光、海水浴场等旅游项目也可能对海水和底质有较大的扰动。

3.2.2 营养盐

珊瑚长期暴露在富营养化海水中, 会影响其新陈代谢、捕食和共生藻密度。一般珊瑚礁区的营养盐较贫瘠, 硝酸盐为 $0.1\text{--}0.5\ \mu\text{mol/L}$, 铵盐为 $0.2\text{--}0.5\ \mu\text{mol/L}$, 无机磷小于 $0.3\ \mu\text{mol/L}$ ^[31]。涠洲岛海域水体活性磷酸盐均值为 $0.09\ \mu\text{mol/L}$, 无机氮均值为 $11.61\ \mu\text{mol/L}$, 其中硝酸盐均值为 $9.26\ \mu\text{mol/L}$, 占比 79.7%。铵盐均值为 $1.73\ \mu\text{mol/L}$ (占比 14.9%)。铵盐主要来源于生物体排泄物和有机物分解, 微生物活动会导致氨氮在沉积物中积累并以无机氮的形式存于底质中^[32]。研究区域内硝酸盐含量远高于铵盐含量, 可能与两者时空分布有关。涠洲岛海域受季风影响较大, 春夏季节转换时海水温度不高, 生物作用较低, 冬季贮存硝酸盐尚未被浮游植物大量消耗, 水体硝酸盐现存量较高, 但细菌分解有机质的速率较低, 导致水体中的铵盐较少。

结合涠洲历史调查数据^[33-34]可知(图 10), 近 10 年来, 涠洲岛无机氮(硝酸盐、铵盐等)含量均远高于一般热带珊瑚礁区含量, 也大于限制浮游植物生长的营养盐浓度阈值($\text{DIN} = 1\ \mu\text{mol/L}$)^[35], 近年来有增加的趋势。例如, 在 WZ11、WZ05 站, 无机氮超二类海水标准($>13\ \mu\text{mol/L}$), 石珊瑚覆盖率和种类数均较低。WZ11 站位邻近南湾养殖海域, 而 WZ05 站则发现了大型藻类—匍扇藻(*Lobophora variegata*)过度生长, 该大型藻易获取营养物质快速生长, 能抑制浮浪幼虫的附着或使浮浪幼虫产生回避行为^[36]。朱葆华等^[37]发现 $0.001\ \text{mol/L}$ 的氨氮或硝氮就能使 3 种珊瑚共生藻的释放明显增多。雷新明等^[38]发现高浓度($>15\ \mu\text{mol/L}$)的硝酸

盐、铵盐、磷酸盐及其营养盐组合浓度 ($>10 \mu\text{mol/L}$) 均对共生藻光合效率有不同程度的抑制作用,且随着营养盐浓度的升高抑制作用加强。本研究发现硝酸盐浓度可能对造礁石珊瑚生长不利,统计学分析也表明无机氮与大部分珊瑚群落成负相关,而铵盐与珊瑚种类数、珊瑚多样性指数均成显著正相关,说明适量的铵盐有利于珊瑚生长。同时发现,10 年来涠洲岛溶解氧的变化范围为 $4.90\text{--}8.12 \text{ mg/L}$ [19-20],本研究结果与该范围保持一致,但有 55.6% 的海域发现超第一类海水水质标准情况。其轻度低氧的现象可能与溶解氧季节性变化或水体富营养化有关 [39]。细菌等微生物在低氧环境下固氮作用增强 [40],产生氨氮,导致铵盐与珊瑚群落具有较高的相关性。

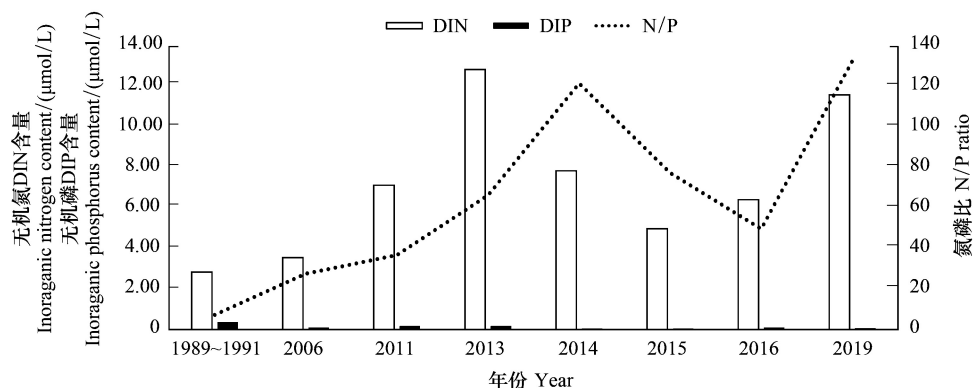


图 10 近 30 年涠洲岛年均无机氮和无机磷含量及 N/P 变化趋势

Fig.10 The trend of annual average of inorganic nitrogen, inorganic phosphorus, and N/P ratio in Weizhou Island for nearly 30 years

涠洲岛磷的存在形态以无机磷为主 (约占 83.3%), 其分布与北部湾季风过程和生物活动密切相关 [30]。尽管 N/P 比自 2011 年起就高于 30, 显示涠洲岛海域营养盐磷限制显著, 但磷酸盐浓度仍可以满足该海域浮游植物的需要 [33]。研究发现涠洲岛磷酸盐浓度较低, 统计分析表明其与溶解氧、叶绿素极显著负相关 (-0.65 和 -0.94 , $P < 0.01$), 这与海水中的磷循环过程一致, 大部分颗粒态的磷最终沉积到水底, 但在缺氧或无氧的状态下, 微生物分解后的磷很快再矿化为溶解的磷, 磷重新悬浮的比例增加 [41]。

无机氮、溶解氧超标站位主要分布于涠洲岛西部和西南海域, 该海域有南湾及蕉坑口养殖区、鳄鱼山景区、涠洲岛客运码头等人类活动区。统计分析表明南湾及其附近人类活动密集区与涠洲岛其他区域珊瑚环境完全不同, 是叶绿素 a 的高值区 (含量 5.91 mg/m^3 , 处于中营养水平) 和悬浮物高值区 (含量在 10 mg/L 以上), 南湾是涠洲岛主要养殖用海, 也是南珠的主要养殖区, 养殖品种包括扇贝、石斑鱼、鲍鱼和珍珠 [42]。养殖活动造成水体富营养化而导致沉积物缺氧或无氧状态, 微生物的活动加速了无机盐从底质向上覆水的释放, 加快了水体营养盐的循环过程 [41]。

4 结论

据 2019 年 5—6 月涠洲岛海域珊瑚礁生态调查数据, 分析了近 10 年来涠洲岛造礁石珊瑚的生态特征及其主导影响因子。涠洲岛造礁石珊瑚覆盖率显著降低, 珊瑚形态组成趋于团块状化, 尽管珊瑚群落多样性较高, 但群落结构较不稳定, 群落分布较松散, 部分优势种种间竞争较激烈, 主要优势种群是耐受干扰种类。悬浮物含量是影响石珊瑚群落最显著的环境因子, 石珊瑚优势种群在不同水深中分布差异显著, 泥沙覆盖率、营养盐对不同石珊瑚种群影响差异较大, 反映不同珊瑚种群有不同的适应环境能力, 而大型海藻覆盖率在局部区域也对优势珊瑚形成较强的竞争关系。短期内, 涠洲岛珊瑚礁退化的主导因素是人类海洋开发活动, 例如, 营养盐和泥沙沉积物的增加与涠洲岛近海养殖业、生活排污、海岸工程及海岸侵蚀等密切相关。

参考文献 (References):

- [1] Yu W J, Wang W H, Yu K F, Wang Y H, Huang X Y, Huang R Y, Liao Z H, Xu S D, Chen X Y. Rapid decline of a relatively high latitude

- coral assemblage at Weizhou Island, northern South China Sea. *Biodiversity and Conservation*, 2019, 28(14): 3925-2949.
- [2] 王文欢, 余克服, 王英辉. 北部湾涠洲岛珊瑚礁的研究历史、现状与特色. *热带地理*, 2016, 36(1): 72-79.
- [3] 梁文, 张春华, 叶祖超, 黎广钊, 农华琼, 王欣. 广西涠洲岛造礁珊瑚种群结构的空间分布. *生态学报*, 2011, 31(1): 39-46.
- [4] 梁文, 黎广钊. 涠洲岛珊瑚礁分布特征与环境保护的初步研究. *环境科学研究*, 2002, 15(6): 5-7, 16-16.
- [5] 梁文, 黎广钊, 范航清, 王欣, 农华琼, 黄晖, 李秀保, 兰国宝. 广西涠洲岛造礁石珊瑚属种组成及其分布特征. *广西科学*, 2010, 17(1): 93-96.
- [6] 黄晖, 马斌儒, 练健生, 杨剑辉, 董志军, 符曲, 梁文. 广西涠洲岛海域珊瑚礁现状及其保护策略研究. *热带地理*, 2009, 29(4): 307-312, 318-318.
- [7] 王欣, 黎广钊. 北部湾涠洲岛珊瑚礁的研究现状及展望. *广西科学院学报*, 2009, 25(1): 72-75, 80-80.
- [8] 陈天然, 郑兆勇, 莫少华, 周雄, 陈特固. 涠洲岛滨珊瑚骨骼生长率变化对气候变暖和极端事件增加的响应. *热带海洋学报*, 2013, 32(5): 79-84.
- [9] 余克服, 蒋明星, 程志强, 陈特固. 涠洲岛 42 年来海面温度变化及其对珊瑚礁的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 506-510.
- [10] Barber R T, Hilding A K, Hayes M L. The changing health of coral reefs. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2001, 7(5): 1255-1270.
- [11] Sournia A. *Phytoplankton manual*//Sournia A, ed. *Monographs on Oceanographic Methodology* 6. Paris: UNESCO, 1978. 251-260.
- [12] 任继周. 草业科学研究方法. 北京: 中国农业出版社, 1998: 45-56.
- [13] 赵敏, 徐文兵, 孔杨云, 王先之, 于应文. 祁连山东段干旱草原 2 种群落物种构成及稳定性研究. *西北植物学报*, 2017, 37(9): 1847-1853.
- [14] 郭水良, 于晶, 陈国奇. 生态学数据分析——方法、程序和软件. 北京: 科学出版社, 2015: 56-56.
- [15] 陈刚. 广西北海涠洲岛珊瑚礁健康调查(Reef Check)报告. 北海: 国家海洋局北海海洋环境监测中心站, 2001.
- [16] 马克平. 中国重点地区与类型生态系统多样性. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1999: 225-268.
- [17] 梁文, 黎广钊, 张春华, 王欣, 农华琼, 黄晖, 李秀保. 20 年来涠洲岛珊瑚礁物种多样性演变特征研究. *海洋科学*, 2010, 34(12): 78-87.
- [18] 李泽鹏. 主要环境因子对滨珊瑚的胁迫作用研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2012.
- [19] 史海燕. 广西北海涠洲岛珊瑚礁海域生态环境监测与评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [20] 梁鑫, 彭在清. 广西涠洲岛珊瑚礁海域水质环境变化研究与评价. *海洋开发与管理*, 2018, 35(1): 114-119.
- [21] Fabricius K E, Wild C, Wolanski E, Abele D. Effects of transparent exopolymer particles and muddy terrigenous sediments on the survival of hard coral recruits. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(4): 613-621.
- [22] Gilmour J. Experimental investigation into the effects of suspended sediment on fertilisation, larval survival and settlement in a scleractinian coral. *Marine Biology*, 1999, 135(3): 451-462.
- [23] Rogers C S. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 62: 185-202.
- [24] Hudson J H. Growth rates in *Montastraea annularis*: a record of environmental change in Key Largo coral reef marine Sanctuary. *Bulletin of Marine Science*, 1981, 31(2): 444-459.
- [25] 肖宝华, 廖宝林, 杨小东, 谢子强. 光照波长和光子照度对霜鹿角珊瑚(*Acropora pruinosa*)生长及代谢的影响. *广东海洋大学学报*, 2016, 36(3): 57-64.
- [26] 肖宝华, 廖宝林, 杨小东, 谢子强. 光谱质量和光子照度对盾形陀螺珊瑚生长及代谢的影响. *广东海洋大学学报*, 2017, 37(1): 72-79.
- [27] Marszalek D S. Impact of dredging on a subtropical reef community, Southeast Florida, U.S.A.//*Proceedings of the 4th International Coral Reef Symposium*. Southeast Florida: ICRS, 1981, 1: 147-153.
- [28] Foster A B. Environmental variation in skeletal morphology within the Caribbean reef corals *Montastraea Annularis* and *Siderastrea Sidera*. *Bulletin of Marine Science*, 1980, 30(3): 678-709.
- [29] 夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风生流及密度流模拟. *海洋学报*, 2001, 23(6): 11-23.
- [30] 韦蔓新, 黎广钊, 何本茂, 李智, 谭趣孜, 王欣. 涠洲岛珊瑚礁生态区各种形态磷含量的季节变化及其影响因素. *应用海洋学报*, 2013, 32(2): 258-265.
- [31] Yellowlees D. Land use patterns and nutrient loading of the Great Barrier Reef Region: proceedings of the Workshop held at the James Cook University of North Queensland, 17-18 November 1990. Townsville: James Cook University Press, 1991: 162-179.
- [32] 王小平. 牛头岛深湾网箱养殖区底质溶液中的氮和磷. *中国水产科学*, 1998, 5(3): 126-128.
- [33] 陈继艺, 陈旭阳, 张春华, 何志江, 李萍. 涠洲岛珊瑚礁海洋公园海域营养盐含量变化及富营养化研究. *海洋湖沼通报*, 2018, (6): 166-174.
- [34] 韦蔓新, 黎广钊, 何本茂, 梁文. 涠洲岛珊瑚礁生态系中浮游动植物与环境因子关系的初步探讨. *海洋湖沼通报*, 2005, (2): 34-39.
- [35] Justić D, Rabalais N N, Turner R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 30(1): 41-46.
- [36] Kuffner I B, Walters L J, Becerro M A, Paul V J, Ritson-Williams R, Beach K S. Inhibition of coral recruitment by macroalgae and cyanobacteria. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 323: 107-117.
- [37] 朱葆华, 王广策, 黄渤, 曾呈奎. 温度、缺氧、氨氮和硝氮对 3 种珊瑚白化的影响. *科学通报*, 2004, 49(17): 1742-1748.
- [38] 雷新明, 黄晖, 王华接, 李秀保, 练健生. 造礁石珊瑚共生藻对富营养的响应研究. *海洋通报*, 2009, 28(1): 44-49.
- [39] 刘慧, 董双林, 方建光. 全球海域营养盐限制研究进展. *海洋科学*, 2002, 26(8): 47-53.
- [40] 余克服. 珊瑚礁科学概论. 北京: 科学出版社, 2018: 182-189.
- [41] 杨宇峰, 赵细康, 王朝晖, 聂湘平. 海水养殖绿色生产与管理. 北京: 海洋出版社, 2007: 38-38.
- [42] 周浩郎, 黎广钊, 梁文, 王欣. 涠洲岛珊瑚健康及其影响因子分析. *广西科学*, 2013, 20(3): 199-204.