

主持人: 李秀保, 郭志强

Open Access

三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻群落结构调查与研究

田 辉[#], 覃乐政, 何林文^{*}

(海南大学 海洋生物与水产学院, 海南 海口 570228 中国)

摘要: 为探究三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻种类和群落结构特征, 于 2023 年 4 月至 2023 年 6 月对三亚蜈支洲岛海洋牧场区 12 个不同站位进行采样调查。结果表明, 在三亚蜈支洲岛海洋牧场的生物调查中, 采集到 29 种大型海藻, 其中红藻门 17 种, 绿藻门 9 种, 褐藻门 3 种, 优势种为脆叉节藻(*Amphiroa fragilissima*) 和喇叭藻(*Turbinaria ornata*)。大型海藻的平均生物量为(2.40±1.89) g·m⁻²。不同种类海藻的平均碳(C)、氮(N)含量分别为 18.80%、0.98%, 不同种类海藻的平均 C/N 比值为 24.04±13.61。大型海藻群落的物种多样性指数(H')、物种丰富度指数(D)、物种均匀度指数(J)平均值分别为 1.28±0.59、5.60±4.61、0.87±0.70。聚类与排序结果表明, 12 个站位被分为 3 个聚类组, 组间 SIMPER 与 ANOSIM 分析结果表明 3 个聚类组之间的大型海藻群落结构有显著差异, 群落结构基本分离。上述研究结果表明, 三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻种类丰富, 但部分特定的优势种藻类和生境之间的差异导致不同聚类组间的群落结构有显著差异。

关键词: 蜈支洲岛海洋牧场; 大型海藻; 碳氮含量; 物种多样性; 群落结构

中图分类号: S932.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2026)01-0144-11

田辉, 覃乐政, 何林文. 三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻群落结构调查与研究[J]. 热带生物学报 (中英文), 2026, 17(1): 144–154. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240142 CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswwb.20240142



海洋牧场是基于海洋生态学原理和现代海洋工程技术, 充分利用自然生产力, 在特定海域科学培育和管理渔业资源而形成的人工渔场^[1]。建设海洋牧场可以实现资源可持续利用与生态环境协调发展^[2], 其中, 海藻场建设是海洋牧场建设的主要措施之一, 能够促进受损生境和生物群落的恢复。

大型海藻是海洋生态系统中的重要组成成员, 为其他海洋生物提供丰富的饵料和理想的栖息地, 促进各类海洋生物的生存和繁殖^[3]。在对大型海藻种类资源的调查中, 杨超杰等^[4]在西沙永兴岛海域发现 42 种大型海藻, 其中, 红藻门 20 种, 绿藻门 14 种, 褐藻门 8 种; 王志铮等^[5]在中街山列岛发现 78 种大型海藻, 其中红藻门有 47 种; 张才学等^[6]在硃洲岛发现 64 种大型海藻, 其中, 红藻门 28 种, 褐藻门 15 种, 绿藻门 20 种, 蓝藻门 1 种。在对大型海藻群落结构的研究中, Portugal

等^[7]发现巴西的海洋保护区与人口稠密海岸的大型藻类群落结构差异明显; 李文涛等^[8]发现山东荣成马山里海域的海草床区、天然礁区和泥沙区之间的大型藻类群落结构有明显差异。上述研究结果表明, 环境异质性对大型海藻多样性及其群落结构具有重要影响。探明大型海藻多样性及其群落结构, 是科学构建海洋牧场区海藻场渔业基础生境的重要前提。三亚蜈支洲岛海洋牧场是海南省首个国家级海洋牧场示范区, 而对该地区的大型海藻种类和群落结构特征的调查与研究还未有报道。

因此, 本研究以三亚蜈支洲岛海洋牧场为调查对象, 对三亚蜈支洲岛海洋牧场的大型海藻进行分析, 包括其种类、生物量、相对重要性指数和多样性指数; 同时, 还分析了海藻的群落结构, 以及海藻的碳、氮含量和 C/N 比值, 探究特定时期内



收稿日期: 2024-09-09

修回日期: 2024-12-18

基金项目: 海南省自然科学基金青年基金项目(321QN0864); 海南大学科研启动基金项目(KYQD(ZR)20059); 海南大学协同创新中心科研项目(XTCX2022HYB07)

第一作者: 田辉(1998—), 男, 海南大学海洋生物与水产学院 2022 级硕士研究生。E-mail: 1072861038@qq.com

通信作者: 何林文(1984—), 男, 副研究员, 博士生导师。研究方向: 大型海藻生理及栽培。E-mail: helinwen@hainanu.edu.cn

三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻的空间分布情况、群落结构差异大小及其原因,进而筛选适宜的海藻种类进行海洋牧场海藻场建设,为推动三亚蜈支洲岛海洋牧场的可持续发展提供基础资料和科学依据。

1 材料与方法

1.1 站位布设 2023 年 4 月至 2023 年 6 月在三亚蜈支洲岛海洋牧场区设置 12 个站位(图 1)进行大型海藻资源调查。在每个站位的平潮线下 2~4 m 和 6~8 m 处以及垂直于岸线方向各设置 1 条调查断面,每条断面布设 1 条长 60 m,宽 1 m 的样带。

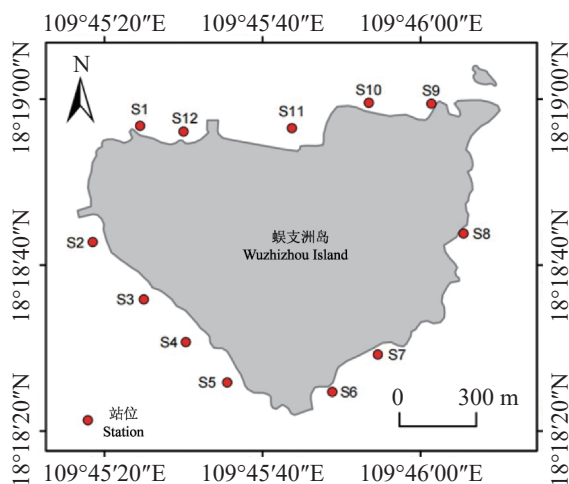


图 1 三亚蜈支洲岛海洋牧场采样站位

Fig. 1 Sampling stations in the Marine Ranch of Wuzhizhou Island, Sanya

1.2 水质因子调查 使用多参数水质仪 (YSI6600, 美国)测定各站位表层水体(水面下 1 m)的温度、盐度、溶解氧、叶绿素 a 等环境参数。

1.3 样品的采集与处理 使用水下数码相机拍摄各个样带大型海藻分布情况,使用剪刀、铲子等工具采集完整的海藻并装入封口袋中。带回实验室后,仔细清理杂藻,并测量藻类的湿质量,后将藻体放在 65 °C 烘箱中烘干 48 h 至恒重(质量)后,测量并记录藻类的干质量。由于各个样带大型海藻种类较少,因此,将各站点 3 条样带内大型海藻样品进行合并分析。

1.4 大型藻类分类与鉴定 对采集到的各种大型海藻根据传统形态学方法进行鉴定,具体参考《海南岛三亚湾珊瑚礁区常见大型海藻》^[9]和《南海常见大型海藻图鉴》^[10]作为鉴定依据。

1.5 大型海藻碳、氮含量测定 将烘干后的藻体分别使用组织研磨仪(TISSUELYSER-64, 上海净信)研磨至颗粒状,再用研钵手磨至均质粉末状后倒入 80 目筛网过筛收集备用。称取 2~3 mg 样品粉末,用锡囊包样后放入元素分析仪(FlashSmart, 赛默飞)中进行碳、氮含量测定。

1.6 数据处理与分析 大型海藻相对重要性指数 I_{RI} , 计算公式 (1):

$$I_{RI} = N \times F \times 10\,000, \quad (1)$$

式中, N 表示某一大型海藻物种生物量占有大型海藻物种总生物量的比例,单位为 %; F 表示某一大型海藻物种出现的站位数占所调查站位数的比例,单位为 %。大型海藻优势种、重要种、常见种、一般种、稀有种分别表示为 $I_{RI} > 1\,000$ 、 $100 \leq I_{RI} < 1\,000$ 、 $10 \leq I_{RI} < 100$ 、 $1 \leq I_{RI} < 10$ 、 $I_{RI} < 1$ ^[11]。

大型海藻群落 Shannon 多样性指数 (H') 计算公式 (2):

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (2)$$

大型海藻群落 Margalef 丰富度指数 (D) 计算公式 (3):

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

大型海藻群落 Pielou 均匀度指数 (J) 计算公式 (4):

$$J = H' / \ln S \quad (4)$$

式中, S 表示大型海藻总物种数, P_i 表示大型海藻种类 i 的生物量占总大型海藻种类生物量的比例, N_i 表示大型海藻种类 i 的生物量, N 表示所有大型海藻种类生物量之和。

使用 PRIMER6.0 软件对大型藻类群落结构进行多元统计分析,使用 SPSS27.0 软件对大型海藻生物量进行 ANOVA 单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示为显著差异。三亚蜈支洲岛海洋牧场采样站位图 and 不同站位大型海藻生物量图分别使用 ArcGIS、GraphPad Prism 软件进行绘制。

2 结果与分析

2.1 三亚蜈支洲岛海洋牧场海域水质特征 三亚蜈支洲岛海洋牧场基本水质特征如表 1 所示,调查期内该海域平均温度为 (28.15 ± 0.27) °C, 平均盐度为 33.41 ± 0.19 , 平均溶解氧为 (6.73 ± 0.06) mg·L⁻¹, 平均叶绿素 a 含量为 (0.21 ± 0.07) μg·L⁻¹。

表 1 三亚蜈支洲岛海洋牧场基本水质特征

Tab. 1 Basic water quality characteristics in the Marine Ranch of Wuzhizhou Island, Sanya

指标 Index	三亚蜈支洲岛海洋牧场采样站位 Sampling stations in the Marine Ranch of Wuzhizhou Island, Sanya											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
温度/℃ Temperature	28.15±0.05	28.32±0.18	28.52±0.01	27.82±0.01	27.80±0.04	27.86±0.06	27.96±0.03	28.39±0.01	27.94±0.01	28.21±0.06	28.41±0.01	28.45±0.04
盐度 Salinity	33.29±0.01	33.65±0.01	33.28±0.01	33.61±0.01	33.64±0.01	33.36±0.03	33.56±0.01	33.62±0.01	33.29±0.01	33.30±0.02	33.02±0.01	33.33±0.03
溶解氧/(mg·L ⁻¹) Dissolved oxygen	6.85±0.01	6.67±0.01	6.67±0.01	6.65±0.01	6.80±0.01	6.69±0.01	6.71±0.01	6.70±0.01	6.79±0.01	6.76±0.01	6.79±0.01	6.69±0.02
叶绿素a/(μg·L ⁻¹) Chlorophyll a	0.24±0.01	0.28±0.02	0.19±0.02	0.17±0.03	0.15±0.01	0.15±0.01	0.15±0.01	0.12±0.01	0.34±0.02	0.29±0.01	0.26±0.01	0.12±0.01

2.2 大型海藻种类组成及种群性质 本次调查站位共有 12 个, 其中, 站位 S9 采集到的大型海藻种类最多有 16 种, 站位 S12 采集到的大型海藻种类最少只有 1 种。本次调查共采集到 29 种大型海藻, 隶属于 3 门 23 属, 完整名录见表 2。其中红藻门种类最多共有 12 属 17 种, 占总量的 58.62%, 分别为脆叉节藻(*Amphiroa fragilissima*)、矮形石叶藻(*Lithophyllum pygmaeum*)、沙菜(*Hypnea* sp.)、易碎幅毛藻(*Actinotrichia fragilis*)、紫杉状海门冬(*Asparagopsis taxiformis*)、叉节藻(*Amphiroa* sp.)、伴绵藻(*Ceratodictyon spongiosum*)、叶状叉节藻(*Amphiroa foliacea*)、钝乳节藻(*Galaxaura obtusata*)、蜈蚣藻(*Grateloupia flicina*)、耳壳藻(*Peyssonnelia squamaria*)、腹扁乳节藻(*Galaxaura*

ventricosa)、乔木乳节藻(*Galaxaura arborea*)、节荚藻(*Lomentaria catenata*)、仙菜(*Ceramium* sp.)、红耳壳藻(*Peyssonnelia rubra*)、不规则腔腺藻(*Coelothrix irregularis*); 绿藻门有 8 属 9 种, 占总量的 31.03%, 分别为阿拉伯松藻(*Codium arabicum*)、网球藻(*Dictyosphaeria cavernosa*)、总状蕨藻(*Caulerpa racemosa*)、布多藻(*Boodlea composita*)、杉叶蕨藻(*Caulerpa taxifolia*)、仙人掌藻(*Halimeda opuntia*)、齿形蕨藻(*Caulerpa serrulata*)、香蕉菜(*Boergesenia forbesii*)、肋叶藻(*Anadyomene wrightii*); 褐藻门有 3 属 3 种, 占总量的 10.35%, 分别为喇叭藻(*Turbinaria ornata*)、马尾藻(*Sargassum* sp.)、南方团扇藻(*Padina australis*)。

表 2 三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻名录

Tab. 2 Enumeration of macroalgae in the Marine Ranch of Wuzhizhou Island, Sanya

门 Phylum	海藻种类 Seaweed species	站位 Station												种群性质 Population nature	I _{RI}
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12		
红藻门 Rhodophyta	脆叉节 <i>Amphiroa fragilissima</i>					+	+			+	+	+	优势种 Dominant species	1 178.79	
	矮形石叶藻 <i>Lithophyllum pygmaeum</i>	+	+	+	+	+	+						重要种 Important species	821.72	
	沙菜 <i>Hypnea</i> sp.	+	+	+	+			+	+	+		+	重要种 Important species	487.53	
	易碎幅毛藻 <i>Actinotrichia fragilis</i>	+		+	+	+		+		+			常见种 Common species	81.15	
	紫杉状海门冬 <i>Asparagopsis taxiformis</i>					+	+	+					常见种 Common species	80.05	
	叉节藻 <i>Amphiroa</i> sp.				+	+				+			常见种 Common species	62.69	
	伴绵藻 <i>Ceratodictyon spongiosum</i>		+										常见种 Common species	39.38	
	叶状叉节藻 <i>Amphiroa foliacea</i>		+										一般种 General species	3.74	

续表 2 Tab. 2 Continued

门 Phylum	海藻种类 Seaweed species	站位 Station												种群性质 Population nature	I_{RI}
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12		
红藻门 Rhodophyta	钝乳节藻 <i>Galaxaura obtusata</i>							+	+					一般种 General species	2.57
	蜈蚣藻 <i>Grateloupia filicina</i>							+						一般种 General species	2.25
	耳壳藻 <i>Peyssonnelia squamaria</i>				+			+		+				一般种 General species	2.23
	腹扁乳节藻 <i>Galaxaura ventricosa</i>				+									一般种 General species	1.93
	乔木乳节藻 <i>Galaxaura arborea</i>									+				稀有种 Rare species	0.64
	节荚藻 <i>Lomentaria catenata</i>										+			稀有种 Rare species	0.57
	仙菜 <i>Ceramium</i> sp.				+									稀有种 Rare species	0.48
	红耳壳藻 <i>Peyssonnelia rubra</i>									+				稀有种 Rare species	0.32
	不规则腔腺藻 <i>Coelothrix irregularis</i>										+			稀有种 Rare species	0.03
	阿拉伯松藻 <i>Codium arabicum</i>				+						+			一般种 General species	8.56
	网球藻 <i>Dictyosphaeria cavernosa</i>				+									一般种 General species	1.99
	总状蕨藻 <i>Caulerpa racemosa</i>										+			一般种 General species	1.02
	布多藻 <i>Boodlea composita</i>										+			稀有种 Rare species	0.36
	绿藻门 Chlorophyta	杉叶蕨藻 <i>Caulerpa taxifolia</i>									+			稀有种 Rare species	0.34
仙人掌藻 <i>Halimeda opuntia</i>										+			稀有种 Rare species	0.23	
齿形蕨藻 <i>Caulerpa serrulata</i>										+			稀有种 Rare species	0.16	
香蕉菜 <i>Boergesenia forbesii</i>										+			稀有种 Rare species	0.16	
肋叶藻 <i>Anadyomene wrightii</i>										+			稀有种 Rare species	0.04	
喇叭藻 <i>Turbinaria ornata</i>				+	+	+		+			+	+	+	优势种 Dominant species	1932.44
褐藻门 Phaeophyta	马尾藻 <i>Sargassum</i> sp.				+								一般种 General species	7.97	
	南方团扇藻 <i>Padina australis</i>				+	+				+			一般种 General species	4.07	

注: “+”表示该站位存在该物种, 空格表示该站位不存在该物种。

Note: “+” indicates the presence of the species at the station, while a space indicates that the species does not exist at the station.

海藻的相对性指数 I_{RI} 结果如表 2 所示, 此次采集到的大型海藻种类优势种有 2 种, 为喇叭藻 (*T. ornata*)、脆叉节藻 (*A. fragilissima*); 重要种有 2 种, 为矮形石叶藻 (*L. pygmaeum*)、沙菜 (*Hypnea* sp.); 常见种有 4 种, 分别为易碎幅毛藻 (*A. fragilis*)、紫杉状海门冬 (*A. taxiformis*)、叉节藻

(*Amphiroa* sp.)、伴绵藻 (*C. spongiosum*)。

2.3 大型海藻生物量 三亚蜈支洲岛海洋牧场各站位大型海藻生物量分布情况如图 2 所示, 三亚蜈支洲岛海洋牧场各站位大型海藻生物量从高到低排序为 S10、S2、S11、S5、S9、S3、S1、S6、S4、S12、S8、S7, 三亚蜈支洲岛海洋牧场各站位大型海

藻平均生物量为 $(2.40 \pm 1.89) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中, 海藻生物量最高的是 S10 站位, 生物量为 $5.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 海藻生物量最低的站位是 S7 站位, 生物量为 $0.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.4 生物多样性 表 3 结果表明, 三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻群落的 Shannon 物种多样性指数 (H') 平均值为 1.28 ± 0.59 , 其中, 站位 S9 的物种多样性指数 (H') 最高, 为 2.03, 站位 S12 的物种多样性指数 (H') 最低, 为 0。三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻群落的 Margalef 物种丰富度指数 (D) 平均值为 5.60 ± 4.61 , 其中, 站位 S8 的物种丰富度指数 (D) 最高, 为 15.47, 站位 S10 的物种丰富度指数 (D) 最低, 为 0.83。三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻群落的 Pielou 物种均匀度指数 (J) 平均值为 0.87 ± 0.70 , 其中, 站位 S10 的物种均匀度指数 (J) 最高为

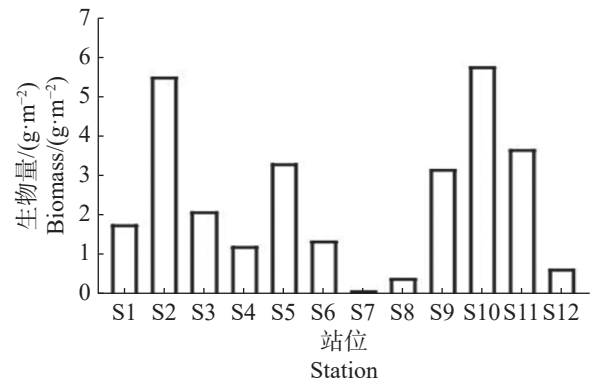


图 2 三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻生物量
Fig. 2 Biomass of macroalgae in the Marine Ranch of Wuzhizhou Island, Sanya

0.97, 站位 S9 的物种均匀度指数 (J) 最低, 为 0.73。由于站位 S12 只发现 1 种大型海藻, 因此未计算 Pielou 物种均匀度指数 (J)。

表 3 三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻群落的多样性指数 (H')、丰富度指数 (D) 及均匀度指数 (J)

Tab. 3 Shannon index (H'), Margalef index (D) and Pielou index (J) of macroalgae communities in the Marine Ranch of Wuzhizhou Island, Sanya

指数 Index	三亚蜈支洲岛海洋牧场采样站位 Sampling stations in the Marine Ranch of Wuzhizhou Island, Sanya											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
H'	1.24	1.70	1.98	1.36	1.46	0.89	1.53	1.68	2.03	0.67	0.86	0
D	3.50	3.73	7.29	5.63	3.12	3.82	*	15.47	11.72	0.83	1.94	*
J	0.90	0.87	0.86	0.85	0.90	0.81	0.95	0.94	0.73	0.97	0.78	*

注: *表示无法计算。

Note: * indicates that it cannot be calculated.

2.5 群落结构特征 三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻群落结构聚类分析 (CLUSTER) 结果如图 3 所示, 按相似性为 20.5% 划分, 12 个采样站位被分为 3 个聚类组, S1、S2、S3、S4、S5、S6 站位被分到同一组, 记为 A, 其中, S5 和 S6 站位、S3 和 S4 站位的大型海藻群落为一级聚类; S9、S10、S11 站位被分到同一组, 记为 B, 其中, S10 和 S11 站位的大型海藻群落为一级聚类; S7、S8、S12 被分到同一组, 记为 C, 其中 S8 和 S12 站位的大型海藻群落为一级聚类。

三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻群落非度量多维尺度排序 (nMDS) 分析结果如图 4 所示, 二维排序图的应力值为 0.13, 其应力值小于 0.2, 表明对 12 个三亚蜈支洲岛海洋牧场采样站位之间的大型海藻群落结构的相似性具有较好的解释意义。按相似性 20.5% 划分, 12 个采样站位被分为

3 个聚类组, 排序结果与聚类分析 (CLUSTER) 结果相同。

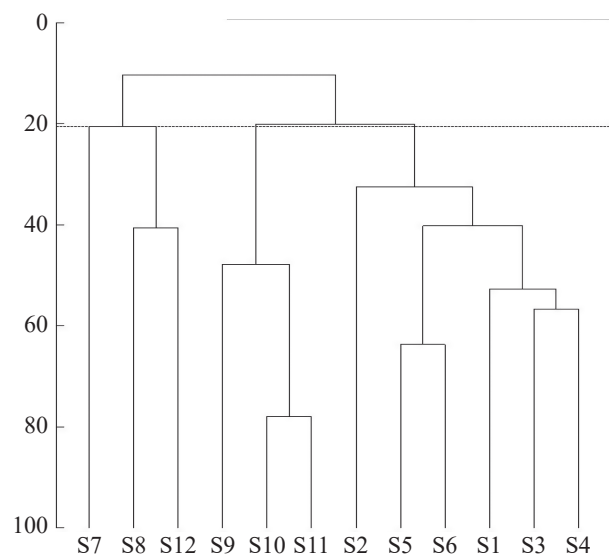


图 3 大型藻类聚类分析
Fig. 3 Cluster analysis of macroalgae

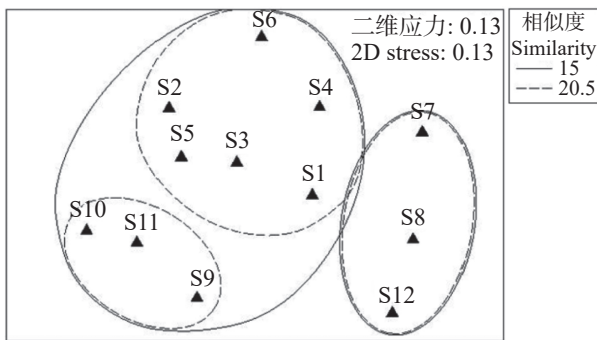


图 4 大型藻类非度量多维尺度排序(nMDS)分析
Fig. 4 Nonmetric multidimensional scale analysis (nMDS) of macroalgae

大型藻类组内 SIMPER 分析结果显示, A 组的 S1、S2、S3、S4、S5、S6 站位平均相似性为 41.99%, 相似性是由矮形石叶藻 (*L. pygmaeum*)、喇叭藻 (*T. ornata*) 造成的, 它们的累计贡献率为 80.35%, 其中, 矮形石叶藻 (*L. pygmaeum*) 的贡献率最大, 为 65.71%。B 组的 S9、S10、S11 站位平均相似性为 57.88%, 相似性是由脆叉节藻 (*A. fragilissima*)、喇叭藻 (*T. ornata*) 造成的, 它们的累计贡献率为 97%, 其中, 脆叉节藻 (*A. fragilissima*) 的贡献率最大, 为 67.04%。C 组的 S7、S8、S12 站位平均相似性为 27.22%, 相似性是由沙菜 (*Hypnea* sp.)、钝乳节藻 (*G. obtusata*) 造成的, 它们的累计贡献率为 100%, 其中, 沙菜 (*Hypnea* sp.) 的贡献率最大, 为 81.47%。

大型藻类组间 SIMPER 分析结果显示, A 组和 C 组之间的相异性为 87.59%, 差异性主要是由矮形石叶藻 (*L. pygmaeum*)、喇叭藻 (*T. ornata*)、沙菜 (*Hypnea* sp.) 造成的, 它们的累计贡献率为 56.03%, 其中, 矮形石叶藻 (*L. pygmaeum*) 的贡献率最大, 为 27.93%。A 组和 B 组之间的相异性为 79.90%, 差异性主要是由脆叉节藻 (*A. fragilissima*)、矮形石叶藻 (*L. pygmaeum*)、喇叭藻 (*T. ornata*) 造成的, 它们的累计贡献率为 65.74%, 其中, 脆叉节藻 (*A. fragilissima*) 的贡献率最大, 为 30.26%。C 组和 B 组之间的相异性为 93.79%, 差异性主要是由脆叉节藻 (*A. fragilissima*)、喇叭藻 (*T. ornata*)、沙菜 (*Hypnea* sp.) 造成的, 它们的累计贡献率为 76.89%, 其中, 叉节藻 (*A. fragilissima*) 的贡献率最大, 为 40.31%。

ANOSIM 分析结果如表 4 所示, A 组、B 组和 C 组这 3 个区域间的大型藻类群落结构有显

著差异 ($R=0.822, P=0.001$)。A 组和 C 组之间的大型藻类群落分离度很高, 并且差异是显著的 ($R=0.864, P=0.012$); A 组和 B 组之间的大型藻类群落分离度较高, 并且差异是显著的 ($R=0.735, P=0.012$); C 组和 B 组之间的大型藻类群落分离度虽然非常高, 但在统计学上并不显著 ($R=1, P=0.1$)。

表 4 大型藻类群落 ANOSIM 分析

Tab. 4 ANOSIM analysis of macroalgal communities

检验对象 Test object	R	P
A×B×C	0.822	0.001
A×C	0.864	0.012
A×B	0.735	0.012
C×B	1.000	0.100

注: A 表示 S1、S2、S3、S4、S5、S6 站位; B 表示 S9、S10、S11 站位; C 表示 S7、S8、S12 站位。

Note: A indicates S1, S2, S3, S4, S5, and S6 stations; B indicates S9, S10, and S11 stations; C indicates S7, S8, and S12 stations.

2.6 大型海藻 C 含量、N 含量及 C/N 比值 采集到的 29 种大型海藻的碳 (C) 含量、碳 (N) 含量、C/N 比值如表 5 所示。三亚蜈支洲岛海洋牧场不同种类海藻的碳含量平均值为 18.80%, 碳含量最高的是齿形蕨藻 (*C. serrulata*), 为 31.74%, 碳含量最低的是蜈蚣藻 (*G. filicina*), 为 11.42%; 红藻门大型海藻的平均碳含量为 17.49%, 绿藻门大型海藻的平均碳含量为 20.23%, 褐藻门大型海藻的平均碳含量为 22.36%; 不同种类海藻的氮含量平均值为 0.98%, 氮含量最高的是伴绵藻 (*C. spongiosum*), 为 2.17%, 氮含量最低的是矮形石叶藻 (*L. pygmaeum*), 为 0.17%; 不同种类海藻的 C/N 比值平均值为 24.04, C/N 比值最高的是矮形石叶藻 (*L. pygmaeum*), 为 77.76, C/N 比值最低的是紫杉状海门冬 (*A. taxiformis*), 为 8.68。

3 讨论

3.1 大型海藻种类和生物量 本次调查共采集到 29 种大型海藻, 其中红藻门种类最多, 共有 17 种, 占 58.62%。三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻群落主要由红藻类群组成, 与中国大型海藻的组成特点相一致。有研究表明, 中国大型海藻种

表 5 三亚蜈支洲岛海洋牧场大型藻类碳含量、氮含量、C/N 比值

Tab. 5 Carbon content, nitrogen content, and C/N ratio of macroalgae in the Marine Ranch of Wuzhizhou Island, Sanya

种类 Species	碳含量/% Carbon content	氮含量/% Nitrogen content	C/N 比值 C/N ratio
耳壳藻 <i>Peyssonnelia squamaria</i>	28.90	1.20	24.08
节荚藻 <i>Lomentaria catenata</i>	23.67	1.49	15.94
伴绵藻 <i>Ceratodictyon spongiosum</i>	23.55	2.17	10.85
紫杉状海门冬 <i>Asparagopsis taxiformis</i>	18.46	2.13	8.68
易碎幅毛藻 <i>Actinotrichia fragilis</i>	18.44	0.74	25.09
沙菜 <i>Hypnea</i> sp.	18.15	1.36	13.39
红耳壳藻 <i>Peyssonnelia rubra</i>	17.72	0.66	26.85
不规则腔腺藻 <i>Coelothrix irregularis</i>	17.55	0.94	18.77
乔木乳节藻 <i>Galaxaura arborea</i>	17.52	0.81	21.63
钝乳节藻 <i>Galaxaura obtusata</i>	15.43	0.69	22.36
仙菜 <i>Ceramium</i> sp.	15.05	0.52	28.93
腹扁乳节藻 <i>Galaxaura ventricosa</i>	15.04	0.81	18.57
叶状叉节藻 <i>Amphiroa foliacea</i>	14.97	0.61	24.54
叉节藻 <i>Amphiroa</i> sp.	14.48	0.57	25.40
脆叉节藻 <i>Amphiroa fragilissima</i>	13.77	0.26	52.96
矮形石叶藻 <i>Lithophyllum pygmaeum</i>	13.22	0.17	77.76
蜈蚣藻 <i>Grateloupia filicina</i>	11.42	0.84	13.59
齿形蕨藻 <i>Caulerpa serrulata</i>	31.74	2.11	15.04
总状蕨藻 <i>Caulerpa racemosa</i>	25.52	1.90	13.43
阿拉伯松藻 <i>Codium arabicum</i>	21.09	1.12	18.83
香蕉菜 <i>Boergesenia forbesii</i>	19.38	0.61	32.03
布多藻 <i>Boodlea composita</i>	17.12	0.98	17.55
仙人掌藻 <i>Halimeda opuntia</i>	15.84	0.46	34.43
网球藻 <i>Dictyosphaeria cavernosa</i>	15.81	0.70	22.59
杉叶蕨藻 <i>Caulerpa taxifolia</i>	15.36	0.73	21.19
肋叶藻 <i>Anadyomene wrightii</i>	*	*	*
马尾藻 <i>Sargassum</i> sp.	25.24	1.11	22.74
喇叭藻 <i>Turbinaria ornata</i>	25.07	0.93	27.10
南方团扇藻 <i>Padina australis</i>	16.76	0.89	18.83

注: *表示数量太少, 未测量结果。

Note: * indicates too few to measure.

类有 1 277 种, 其中红藻门最多, 共有 607 种^[12]; 中街山列岛共有海藻 78 种, 其中红藻门最多, 共有 47 种^[13]; 舟山马鞍列岛共有 36 种藻类, 其中红藻门最多, 共有 19 种^[14]。在对海南岛大型底栖海藻的研究中发现大型海藻种类有 83 种, 其中红藻门最多, 共有 51 种^[15]; 海南省三亚大东海、小东海、鹿回头、天涯海角、三亚港附近共有海藻 53 种, 其中红藻门最多, 共有 32 种^[16]。在三亚蜈支洲岛周围海域的三亚岩相潮间带底栖海藻群落结构的调查中共发现大型底栖藻类 130 种, 其中, 红藻门有 67 种^[17], 并且在本研究中发现的 29 种大型海藻

中, 有 21 种与在三亚岩相潮间带发现的底栖海藻种类相同。本次调查中生物量最少的站位是 S7、S8、S12, 其中, 站位 S12 位于蜈支洲岛码头以及海上运动项目区域, 受人类活动影响最大, 在该站位只发现了 1 种海藻。有研究表明, 在人为活动区域影响下, 海藻种类和生物量明显降低^[18]。站位 S7、S8 位于蜈支洲岛东南侧, 该区域在 4-6 月受季风气候影响, 受风浪冲击较大, 生物量最低。李文涛等^[8]也发现在受海浪冲击较大的生境中, 藻类生物量最低。本研究在调查期内发现, 三亚蜈支洲岛海洋牧场海域平均温度为 (28.15±0.27) °C, 平

均盐度为(33.41±0.19), 平均溶解氧为(6.73±0.06) mg·L⁻¹, 平均叶绿素 a 含量为(0.21±0.07) μg·L⁻¹, 而位于蜈支洲岛东北部区域的站点 S9、S10、S11 的溶解氧含量和叶绿素 a 含量远高于平均值。马文刚^[19] 等发现三亚蜈支洲岛海洋牧场北部区域水体中的营养盐和表层沉积物有机质含量高于南部区域, 而本次调查中生物量最多的站点 S10 位于此区域。该区域的海水营养盐含量较高, 可为大型海藻生长提供足够的营养物质^[20]。

3.2 优势种及多样性指数 物种多样性变化受物种的优势度模式和物种均匀度变化的影响, 当较少的藻种种类占据较多的生物量时, 会导致物种丰富度指数、物种多样性指数以及物种均匀度指数等多个指标降低, 表明生态系统的物种多样性受到影响, 且生物量分布不均匀^[21]。柳林青等^[22] 发现粤港澳大湾区优势种种类占总物种数的 15.38%, 优势种生物量占总物种生物量的 60.16%, 导致粤港澳大湾区海藻的物种丰富度指数(*D*)较低; 张才学等^[6] 发现硇洲岛大型海藻优势种种类占总物种数的 20.31%, 优势种生物量占总物种生物量的 90.77%, 导致大型海藻物种多样性指数偏低。本次研究结果显示, 三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻优势种种类占总物种数的 6.90%, 优势种生物量占总物种生物量的 61.42%, 与以上研究结果一致。数量较少的大型海藻种类占据了较多的生物量, 导致三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻群落的物种多样性指数(*H'*)较低, 不利于三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻的生物多样性稳定。对比邻近的亚龙湾、榆林港湾口、鹿回头、天涯海角和南山寺附近海区的潮间带底栖海藻多样性指数^[17], 三亚蜈支洲岛海洋牧场的 Shannon 物种多样性指数(*H'*)、Margalef 物种丰富度指数(*D*)、Pielou 物种均匀度指数(*J*)相对偏高。其原因可能是, 其他附近海域受人为活动影响较大, 而三亚蜈支洲岛海洋牧场海域受到严格保护, 并且拥有优质的水环境条件和多样性的底栖生境类型, 使该区域的底栖生物丰富度更高^[19]。

3.3 海藻群落结构 本研究中, 聚类分析(CLUSTER)和非度量多维尺度排序(nMDS)分析将 12 个三亚蜈支洲岛海洋牧场采样站位分为 3 个聚类组。SIMPER 分析结果显示, 这 3 个聚类组之间的相异性主要由矮形石叶藻(*L.*

pygmaeum)、喇叭藻(*T. ornata*)、沙菜(*Hypnea* sp.)、脆叉节藻(*A. fragilissima*)造成的。很多研究表明, 不同海藻群落之间的差异性主要由少数几个特定的大型藻类物种所导致^[23-24]。聂猛等^[25] 在对青岛栈桥、威海双岛湾及荣成月湖这 3 个海域大型附生海藻群落调查中发现, 这 3 个海域之间的相异性也是由少数几个特定的大型藻类物种所导致(萱藻和褐毛藻)。ANOSIM 分析结果显示, 这 3 个聚类组之间的大型藻类群落结构有显著差异, 群落结构基本分离, 这种差异主要是由于站位的生境差异造成。李文涛等^[8] 也发现山东马山里海域底栖大型藻类群落结构在不同生境间呈现显著性差异。三亚蜈支洲岛海洋牧场位于琼东上升流区^[26], 受西南季风的影响, 上升流的时间主要为 4-9 月^[27], 在此期间上升流能够抑制海水高温并带来丰富的营养盐等物质, 能够影响海藻的生长和分布。地形是影响上升流的主要因素, 大陆架上的等温线和等盐线随着上升流向近岸逐渐上升^[27]。站点 S7、S8 位于蜈支洲岛东南方向, 站点 S2、S3、S4、S5 位于蜈支洲岛西南方向, 站点 S9、S10、S11 位于蜈支洲岛东北方向, 推测位于蜈支洲岛同一方向上的站点受上升流影响相同, 被归为同一聚类组, 这与聚类分析(CLUSTER)和非度量多维尺度排序(nMDS)分析结果基本一致。

3.4 海藻碳、氮含量及 C/N 比值 藻类通过光合作用将可溶性 CO₂ 固定, 并将其转变成可溶性的有机碳, 从而达到减少水体 CO₂ 分压的目的, 通过生物泵作用进入海洋碳循环, 经过沉降、沉降等过程, 最终成为大气 CO₂ 的“汇”^[28], 实现碳中和。大型海藻具有极高的初级生产力和固碳作用, 大型海藻养殖能够增加海洋碳汇, 有研究表明全球大型藻类每年可固碳 0.7 Gt, 占全球海洋年均净固碳总量的 35% 左右^[29]。中国人工养殖的海藻每年大约能从海水中移出 30 万 ~ 38 万 t 的碳, 大型海藻对增加海洋碳汇及海洋生态修复具有重要价值^[30]。不同种类的大型海藻的无机碳利用机制不同导致其碳含量存在较大差异^[29]。大型绿藻能催化对 HCO₃⁻ 的吸收, 在较高 pH 条件下能够增强其光合作用能力^[31]; 褐藻在蓝光条件下比在红光条件下有着更高的 pH 补偿点, 在蓝光条件下其光合作用能力更强^[32]; 红藻对 HCO₃⁻ 的利用能力低于褐藻和绿藻^[33], 潮间带分布的红藻能够通过胞外碳酸酐

酶(CA)催化 HCO_3^- 作为光合作用外在碳源^[34], 而潮下带分布的红藻不存在胞外碳酸酐酶(CA)活性^[35]。一般认为大型海藻无机碳利用能力由高到低依次为绿藻、褐藻、红藻^[36]。本次研究发现红藻门大型海藻的平均碳含量为 17.49%, 绿藻门大型海藻的平均碳含量为 20.23%, 褐藻门大型海藻的平均碳含量为 22.36%, 绿藻门和褐藻门平均碳含量高于红藻门。大型海藻组织碳含量还与环境温度、空气中的 CO_2 分压及水中溶解的 CO_2 和 HCO_3^- 浓度有关^[37], 有研究表明, 温度和 CO_2 分压升高会促使海藻组织碳含量增加^[38]。周伟男等^[39] 发现硃洲岛岩相潮间带的 50 种海藻碳含量的变化范围为 4%~42%, 平均含量为 27.57%, 其中马尾藻的碳含量为 37.19%, 叉节藻的碳含量为 27.57%, 而本研究中三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻组织碳含量的变化范围为 11.42%~31.74%, 平均含量为 18.80%, 其中, 马尾藻的碳含量为 25.24%, 叉节藻的碳含量为 14.48%。硃洲岛和三亚蜈支洲岛地理位置较远、环境差异明显及海藻种类不同, 导致相同种类的海藻碳含量和海藻碳含量变化范围差异明显。

大型海藻可以吸收和储存大量的可溶性无机氮, 有助于减轻和修复海域的富营养化问题^[40]。王玉珏等^[41] 发现烟台潮间带大型海藻氮含量变化范围为 1.36%~5.62%, 平均含量为 4.14%。本次研究结果显示, 三亚蜈支洲岛海洋牧场海藻组织氮含量在 0.17%~2.17% 之间, 平均值为 0.98%。三亚蜈支洲岛海洋牧场与烟台潮间带大型海藻组织氮含量的变化范围存在差异, 主要原因是中国温带与热带海域的大型海藻种类不同和环境营养盐水平差异。不同种类的海藻对铵盐和硝酸盐的吸收有差别^[42], 其中生长速率较快的海藻会吸收更多的氮^[43]。不同海域的营养盐含量差异也会导致大型海藻体内氮含量的不同^[44]。Fenchel 等^[45] 发现底栖植物的 C/N 比值在 10~70 之间, 本次研究数据中的 C/N 比值变化范围为 8.68~77.76 与文献报道的范围基本吻合。大型海藻较高的 C/N 比值与该海藻对可溶性无机氮吸收能力低和能够实现快速氮释放的能力有关^[46]。

3.5 三亚蜈支洲岛海洋牧场海藻场建设的适宜藻种 筛选适宜的海藻种类进行海洋牧场海藻场建设, 能够推动三亚蜈支洲岛海洋牧场的可持续发

展。建设海藻场能够重建自然碳汇, 在增加海洋碳汇和应对气候变化中具有重要作用^[47]。本研究中红藻门的耳壳藻、绿藻门的齿形蕨藻和总状蕨藻、褐藻门的马尾藻和喇叭藻碳含量都在 25% 以上, 在建设海藻场时应优先考虑这些具有较强固碳能力的藻种。其次, 优势种海藻的生物量和生产力是海藻生态系统的重要组成部分, 它们的生长、繁衍、竞争等过程会影响群落的物种组成、覆盖度和稳定性, 对整个海藻群落的结构和功能有重要影响^[48]。因此, 本研究中喇叭藻、脆叉节藻等优势种也可以作为开展蜈支洲岛海洋牧场海藻场建设的优选藻种。

4 结论

本次调查在三亚蜈支洲岛海洋牧场共采集到 29 种大型海藻, 其中红藻门 17 种, 绿藻门 9 种, 褐藻门 3 种。大型海藻的平均生物量为 $2.40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。海藻碳、氮含量范围分别为 11.42%~31.74%、0.17%~2.17%, 海藻 C/N 比值范围为 8.68~77.76。三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻种类优势种有 2 种, 为脆叉节藻 (*A. fragilissima*) 和喇叭藻 (*T. ornata*)。大型海藻群落的物种多样性指数 (H') 较低。聚类分析 (CLUSTER) 及非度量多维尺度排序 (nMDS) 按相似性 20.5% 将 12 个站位分为 3 个聚类组, 组间 SIMPER 与 ANOSIM 分析结果显示, 这 3 个聚类组之间的大型海藻群落结构有显著差异, 群落结构基本分离。以上结果表明, 三亚蜈支洲岛海洋牧场大型海藻种类丰富, 但部分特定的优势种藻类和生境之间的差异导致了不同聚类组间的群落结构有显著差异。

参考文献:

- [1] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1133-1140.
- [2] 许强, 刘维, 高菲, 等. 发展中国南海热带岛礁海洋牧场: 机遇、现状与展望[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(5): 173-180.
- [3] 韩秋影, 尹相博, 刘东艳. 烟台养马岛潮间带大型海藻分布特征及环境影响因素[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3655-3663.
- [4] 杨超杰, 邢晓萱, 童玉和, 等. 西沙永兴岛海域大型海藻种类组成和资源分布特征[J]. 海南热带海洋学院学报, 2022, 29(5): 36-44.
- [5] 王志铮, 张义浩, 吴常文, 等. 中街山列岛底栖海藻的资源调查[J]. 水产学报, 2002, 26(2): 189-192.
- [6] 张才学, 周伟男, 孙省利, 等. 硃洲岛大型海藻群落的季

- 节演替[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(1): 74–84.
- [7] Portugal A B, Carvalho F L, De Oliveira Soares M, et al. Structure of macroalgal communities on tropical rocky Shores inside and outside a marine protected area [J]. *Marine Environmental Research*, 2017, 130: 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.07.019>
- [8] 李文涛, 王欢, 仲崇凤, 等. 山东荣成马山里海域大型藻类群落结构时空变化研究[J]. *海洋科学*, 2022, 46(5): 74–85.
- [9] 李秀保, T V 蒂特利亚诺娃, E A 蒂特利亚诺夫. 海南岛三亚湾珊瑚礁区常见大型海藻[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [10] 刘涛. 南海常见大型海藻图鉴[M]. 北京: 海洋出版社, 2017.
- [11] 樊紫薇. 浙江中部近岸海域鱼卵、仔稚鱼群落结构特征研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2020.
- [12] 丁兰平, 黄冰心, 谢艳齐. 中国大型海藻的研究现状及其存在的问题[J]. *生物多样性*, 2011, 19(6): 798–804.
- [13] 陆艳用, 马玉心, 崔大练, 等. 中街山列岛保护区底栖海藻分布与资源特征[J]. *水产科学*, 2011, 30(5): 269–275.
- [14] 蔡丽萍, 金敬林, 吴盈子, 等. 舟山马鞍山列岛海洋特别保护区岩相潮间带底栖藻类初步调查与研究[J]. *海洋开发与管理*, 2014, 31(4): 89–94.
- [15] 王红勇, 吴洪流, 姚雪梅, 等. 海南岛常见的大型底栖海藻[J]. *热带生物学报*, 2010, 1(2): 175–182. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7054.2010.02.015>
- [16] 朱华贤, 李伟新, 丁镇芬. 海南省三亚海藻资源调查[J]. *湛江水产学院学报*, 1989, 9(S1): 116–120.
- [17] 陈自强, 寿鹿, 廖一波, 等. 三亚岩相潮间带底栖海藻群落结构及其季节变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(11): 3370–3382.
- [18] 冯天威, 刘正一, 付晚涛, 等. 辽宁省黄海沿岸人工岸线潮间带大型海藻调查与分析研究[J]. *海洋科学*, 2013, 37(12): 17–27.
- [19] 马文刚, 夏景全, 魏一凡, 等. 三亚蜈支洲岛海洋牧场近岛区底表大型底栖动物群落结构及评价[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(3): 135–146. <https://doi.org/10.11978/2021125>
- [20] 徐帅帅, 邸宝平, 王玉珏, 等. 我国典型潮间带底栖硅藻群落空间分布特征[J]. *海洋学报*, 2017, 39(6): 95–113. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4193.2017.06.010>
- [21] Eriksson B K, Rubach A, Hillebrand H. Biotic habitat complexity controls species diversity and nutrient effects on net biomass production [J]. *Ecology*, 2006, 87(1): 246–254. <https://doi.org/10.1890/05-0090>
- [22] 柳林青, 刘之威, 何泉, 等. 粤港澳大湾区潮间带大型海藻多样性与生物量分布格局[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(3): 677–684.
- [23] 盛化香. 崂山湾人工鱼礁区底栖大型海藻群落的季节性和区域性变化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 47–48.
- [24] 刘国山. 威海双岛人工鱼礁区大型底栖动物与海藻群落演替特征及其生态作用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014: 102–104.
- [25] 聂猛, 李文涛, 李勇, 等. 山东半岛典型海域大叶藻 (*Zostera marina*) 附着大型藻类群落结构[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1786–1794.
- [26] 李秀保, 王爱民, 刘胜, 等. 海南岛珊瑚礁的保护与修复[C]// 第三届现代海洋(淡水)牧场学术研讨会摘要集. 中国水产学会海洋牧场研究会, 2019: 15–16.
- [27] Li K, Yin J, Huang L, et al. Distribution and abundance of thaliaceans in the northwest continental shelf of South China Sea, with response to environmental factors driven by monsoon[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(9): 979–989. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.03.004>
- [28] Chung I K, Beardall J, Mehta S, et al. Using marine macroalgae for carbon sequestration: a critical appraisal [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2011, 23(5): 877–886. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9604-9>
- [29] 何培民, 刘媛媛, 张建伟, 等. 大型海藻碳汇效应研究进展[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(3): 588–595.
- [30] 张永雨, 张继红, 梁彦韬, 等. 中国近海养殖环境碳汇形成过程与机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(12): 1414–1424.
- [31] Larsson C, Axelsson L. Bicarbonate uptake and utilization in marine macroalgae [J]. *European Journal of Phycology*, 1999, 34(1): 79–86. <https://doi.org/10.1080/09670269910001736112>
- [32] Schmid R, Dring M J, Forster R M. Kinetics of blue-light stimulation and circadian rhythmicity of light-saturated photosynthesis in brown algae: a species comparison [J]. *Journal of Phycology*, 1994, 30(4): 612–621. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1994.00612.x>
- [33] Maberly S C, Raven J A, Johnston A M. Discrimination between ^{12}C and ^{13}C by marine plants [J]. *Oecologia*, 1992, 91(4): 481–492. <https://doi.org/10.1007/BF00650320>
- [34] Mercado J M, Gordillo F J L, Figueroa F L, et al. External carbonic anhydrase and affinity for inorganic carbon in intertidal macroalgae [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, 221(2): 209–220. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(97\)00127-5](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(97)00127-5)
- [35] Johnston A M, Maberly S C, Raven J A. The acquisition of inorganic carbon by four red macroalgae [J]. *Oecologia*, 1992, 92(3): 317–326. <https://doi.org/10.1007/BF00317457>
- [36] 韩博平, 韩志国, 付翔. 藻类光合作用机理与模型[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [37] 赵玥茹, 蔡恒江, 王选忠, 等. 小长山岛 3 种大型海藻组织碳、氮含量和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的环境指示意义[J]. *应用海洋学学报*, 2023, 42(4): 667–674.
- [38] Gao G, Clare A S, Rose C, et al. *Ulva rigida* in the future ocean: potential for carbon capture, bioremediation and biomethane production [J]. *GCB Bioenergy*, 2018, 10(1): 39–51. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12465>
- [39] 周伟男. 碓洲岛岩礁带底栖生物的群落结构及大型海藻的碳汇作用[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013: 36–39.
- [40] Riera P, Stal L J, Nieuwenhuize J. Heavy $\delta^{15}\text{N}$ in intertidal benthic algae and invertebrates in the Scheldt Estuary (the Netherlands): effect of river nitrogen inputs [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 51(3): 365–372. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0684>
- [41] 王玉珏, 邸宝平, 李欣, 等. 潮间带大型海藻氮稳定同位素的环境指示作用[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(2):

- 174–179.
- [42] Pritchard D W, Hurd C L, Beardall J, et al. Restricted use of nitrate and a strong preference for ammonium reflects the nitrogen ecophysiology of a light-limited red Alga [J]. *Journal of Phycology*, 2015, 51(2): 277–287. <https://doi.org/10.1111/jpy.12272>
- [43] Pedersen M F, Borum J. Nutrient control of estuarine macroalgae: growth strategy and the balance between nitrogen requirements and uptake [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 161: 155–163. <https://doi.org/10.3354/meps161155>
- [44] Gómez Pinchetti J L, Del Campo Fernández E, Moreno Díez P, et al. Nitrogen availability influences the biochemical composition and photosynthesis of tank-cultivated *Ulva rigida* (Chlorophyta) [J]. *Journal of Applied Phycology*, 1998, 10(4): 383–389. <https://doi.org/10.1023/A:1008008912991>
- [45] Fenchel T M, Jørgensen B B. Detritus food chains of aquatic ecosystems: the role of bacteria [M]// *Advances in Microbial Ecology*. Boston, MA: Springer US, 1977: 1–58.
- [46] Tyler A C, Mcglathery K J, Macko S A. Uptake of urea and amino acids by the macroalgae *Ulva lactuca* (Chlorophyta) and *Gracilaria vermiculophylla* (Rhodophyta) [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 294: 161–172. <https://doi.org/10.3354/meps294161>
- [47] 刘慧, 唐启升. 国际海洋生物碳汇研究进展[J]. *中国水产科学*, 2011, 18(3): 695–702.
- [48] Harley C D G, Anderson K M, Demes K W, et al. Effects of climate change on global seaweed communities [J]. *Journal of Phycology*, 2012, 48(5): 1064–1078. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01224.x>

Community structure of macroalgae in the Marine Ranch of Wuzhizhou Island, Sanya

Tian Hui[#], Qin Lezheng, He Linwen^{*}

(School of Marine Biology and Fisheries, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: To explore the characteristics of macroalgae species and community structure in the Marine Ranch of Wuzhizhou Island, Sanya, sampling surveys were conducted from April 2023 to June 2023 at 12 different sites within the marine ranch area. A total of 29 species of macroalgae were collected, including 17 species from the Rhodophyta phylum, 9 species from the Chlorophyta phylum, and 3 species from the Phaeophyta phylum. The dominant species were *Amphiroa fragilissima* and *Turbinaria ornata*. The average biomass of macroalgae was $(2.40 \pm 1.89) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. The average carbon content and nitrogen content of different species of macroalgae were 18.80% and 0.98%, respectively, with an average C/N ratio of 24.04 ± 13.61 . The mean values of species diversity index (H'), species richness index (D), and species evenness index (J) of the macroalgae community were 1.28 ± 0.59 , 5.60 ± 4.61 , and 0.87 ± 0.70 , respectively. Cluster and ordination analysis revealed that the 12 sites were grouped into 3 clusters. SIMPER and ANOSIM analyses indicated significant differences in the community structure of macroalgae among these three clusters, with basic separation of community structures. These results suggest that the Marine Ranch of Wuzhizhou Island, Sanya harbors a rich diversity of macroalgae, but significant differences in community structure exist among different clusters due to specific dominant species and habitat variations.

Keywords: Marine Ranch of Wuzhizhou Island, Sanya; macroalgae; carbon and nitrogen content; species diversity; community structure

(责任编辑: 钟云芳)