



## 庙岛群岛海藻场群落结构特征分析

李宝齐, 陈伟洲, 王宁, 姜会超, 庄明坤, 吕峥峥, 张琦, 郭晓茜, 徐智广

### Analysis of the community structure characteristics of seaweed beds in the Miaodao Archipelago

Li Baoqi, Chen Weizhou, Wang Ning, Jiang Huichao, Zhuang Mingkun, Lv Zhengzheng, Zhang Qi, Guo Xiaoxi, Xu Zhiguang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12284/hyxb2026026>

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 我国海参物种多样性及分类现状

Species diversity and taxonomic status of sea cucumbers in China

海洋学报. 2026, 48(1): 1-29 <https://doi.org/10.12284/hyxb2026008>

##### 2019 - 2020年夏季舟山海域浮游动物优势种生态位及其生态分化

Ecological niches and ecological differentiation of dominant zooplankton species in the Zhoushan waters in summer 2019/2020

海洋学报. 2022, 44(10): 127-139 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022170>

##### 黄河口及邻近海域鱼卵、仔稚鱼群落结构及多样性的年间变化

Annual changes in the community structure and diversity of fish eggs and larvae in the Huanghe River Estuary and its adjacent waters

海洋学报. 2022, 44(4): 36-46 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022074>

##### 涠洲岛西南部海域造礁石珊瑚的群落结构特征分析

Studies on scleractinian coral community structure characteristics in the southwest seawaters of the Weizhou Island

海洋学报. 2021, 43(11): 123-135 <https://doi.org/10.12284/hyxb2021150>

##### 鼠尾藻 (*Sargassum thunbergii*) 固碳能力对流速的响应

Response of carbon sequestration capacity of *Sargassum thunbergii* to water flow speed

海洋学报. 2022, 44(2): 113-122 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022030>

##### 浙江岩礁潮间带大型底栖动物主要优势种的生态位及种间联结性

Niche and interspecies association of major dominant species in the rocky intertidal zone of Zhejiang Province, China

海洋学报. 2026, 48(1): 64-82 <https://doi.org/10.12284/hyxb2026016>

关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李宝齐, 陈伟洲, 王宁, 等. 庙岛群岛海藻场群落结构特征分析[J]. 海洋学报, 2026, 48(3): 72–83, doi:10.12284/hyxb2026026  
Li Baoqi, Chen Weizhou, Wang Ning, et al. Analysis of the community structure characteristics of seaweed beds in the Miaodao Archipelago[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(3): 72–83, doi:10.12284/hyxb2026026

## 庙岛群岛海藻场群落结构特征分析

李宝齐<sup>1,2</sup>, 陈伟洲<sup>2</sup>, 王宁<sup>3</sup>, 姜会超<sup>3</sup>, 庄明坤<sup>1</sup>,  
吕峥峥<sup>1</sup>, 张琦<sup>1</sup>, 郭晓茜<sup>1</sup>, 徐智广<sup>1\*</sup>

(1. 鲁东大学 生命科学学院, 山东 烟台 264025; 2. 汕头大学 海洋生物研究所, 广东 汕头 515063; 3. 山东省海洋资源与环境研究院, 山东 烟台 264006)

**摘要:** 山东省庙岛群岛海域的海藻资源十分丰富, 在近海海洋碳汇具有重要潜力, 但目前关于庙岛群岛海藻场的基础数据和相关研究尚非常缺乏, 限制了对海藻场碳汇的核算和评价。为弥补庙岛群岛海藻场基础数据的空白, 本研究选择山东省庙岛群岛 10 个居民岛, 采用水肺潜水方式对潮下带海藻场的分布进行了调查和样方取样, 并对藻场中大型海藻的种类、生物量、优势种、群落多样性等海藻资源信息进行了鉴定和统计, 进而结合环境背景, 对 10 个岛的海藻场群落结构特征进行了聚类分析。本研究共采集到大型海藻 34 种, 隶属 21 科、25 属。其中红藻 18 种, 涉及 11 科、15 属; 绿藻 4 种, 涉及 2 科、2 属; 褐藻 12 种, 涉及 8 科、8 属。大型海藻优势种有海带、裙带菜、海黍子、石花菜、日本角叉菜、石莼、叉开网翼藻、海蒿子、酸藻等。统计分析结果显示, 砣矶岛、小钦岛的生物量密度较高; 北长山岛海藻场物种丰富度最高, 庙岛、南隍城岛次之; 南隍城岛海藻场多样性指数最高, 北长山岛和砣矶岛次之; 南隍城岛海藻场均匀度指数也均高于其他区域。聚类分析 (Cluster) 结果显示, 南五岛 (南长山岛、北长山岛、庙岛、大黑山岛、小黑山岛) 与北五岛 (砣矶岛、大钦岛、小钦岛、南隍城岛、北隍城岛) 在群落结构上具有显著差异, 且北五岛平均生物量高于南五岛, 这表明地理格局是驱动群落组成差异的关键因素。本研究在一定程度上弥补了山东省海藻资源相关基础数据的空白, 可为山东省海藻场的碳汇评价和发展近海蓝碳增汇提供重要的数据和理论支持。

**关键词:** 庙岛群岛; 大型海藻; 物种多样性; 优势种

中图分类号: S932.7 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2026)03-0072-12

### 1 引言

大型海藻是一类营自生生活, 能够进行光合作用的肉眼可见的藻类<sup>[1]</sup>。大型海藻包括红藻、绿藻、褐藻 3 个门类, 种类丰富, 广泛分布于潮间带和潮下带的岩礁上<sup>[2]</sup>, 也有部分物种漂浮在海面, 全世界约有 9 800 种大型海藻<sup>[3]</sup>。大型底栖海藻作为重要的海洋初级生产者, 能够支持多种生物在近海形成海藻场生态系统, 其支撑种较为丰富, 包括马尾藻属 (*Sargassum*)、

海带属 (*Laminaria*)、裙带菜属 (*Undaria*)、巨藻属 (*Macrocystis*) 等<sup>[4]</sup>。世界范围内广泛分布着众多天然海藻场<sup>[5]</sup>, 而我国除江苏沿海以外, 从南到北其他各沿海省份均有丰富的天然海藻场分布<sup>[6-7]</sup>。20 世纪 70 年代, 曾呈奎院士团队对我国潮间带海藻生物种群进行了系统性调查, 共确认我国潮间带海藻种类 835 种, 隶属于绿藻门 15 科 45 属 207 种、红藻门 36 科 140 属 463 种、褐藻门 25 科 54 属 165 种<sup>[8]</sup>。此后几十年间, 我国近海海藻场系统调查几乎处于空白。

收稿日期: 2025-12-31; 修订日期: 2026-02-05。

基金项目: 国家自然科学基金 (42276119)。

作者简介: 李宝齐 (1999—), 男, 山东省德州市人, 博士研究生, 研究方向为大型海藻生理生态。E-mail: libaoqiytd@163.com

\* 通信作者: 徐智广, 教授, 主要从事大型海藻生理生态学方向研究。E-mail: bigwide@163.com

大型海藻富含多种蛋白质、多糖等营养物质,具有增强自身免疫力等多重功效<sup>[9-10]</sup>。不仅如此,海藻还是众多养殖饲料、海藻肥、化妆品、生物燃料等的生产原料<sup>[11]</sup>,具有十分可观的经济价值<sup>[7]</sup>。大型海藻能够通过光合作用将海水中的无机氮、磷转化为有机物,并向环境中释放有机碳,完成大气中CO<sub>2</sub>向海洋中转移的过程<sup>[12-14]</sup>。另外,不同物种大型海藻的结构千姿百态<sup>[15]</sup>,这些复杂结构为许多海洋动物创造了良好的栖息条件<sup>[16-17]</sup>、索饵和产卵场所<sup>[18]</sup>。因此,大型海藻在促进海洋经济、减轻海域富营养化、增加海洋碳汇、维护近海生态系统稳定等方面均发挥着极其重要的经济和生态作用。

大型海藻群落作为近海生态系统的重要组成部分,其结构不仅反映环境条件的变化,也是评估生态系统健康的重要指标。温度是影响群落结构变化的主要因子,长期升温会导致冠层藻类光合能力下降、固着力减弱,从而引发群落结构改变<sup>[19]</sup>。还有研究表明富营养条件下,快速生长的机会主义海藻通常会取代多年生的大型藻类,导致群落结构单一,系统稳定性下降<sup>[20-21]</sup>。此外,沉积物累积、污染物输入也会削弱海藻附着与再生能力,加速海藻场退化<sup>[22]</sup>。近年来,世界各地大型海藻场退化严重,欧美等国家纷纷报道了海藻场面积急剧减小的现象<sup>[23]</sup>。被联合国教科文组织列为“贝藻王国”的南麂列岛,自20世纪80年代至今,以铜藻(*Sargassum horneri*)为主要支撑种的海藻场几乎消失殆尽<sup>[24-25]</sup>。由于大型海藻在食品、工业、医药等多个领域具有广泛的应用空间,具有重要的经济和使用价值,使得人们对野生海藻资源进行了不可控制的过度开发。有研究发现,海洋保护区与人口密集海岸的大型海藻群落结构存在差异<sup>[26]</sup>,近岸海区人为的破坏和占用,如修建沿海公路、填海造地、围海养殖等人类活动大大破坏了主要在潮间带、潮下带营固着生活的大型海藻的生存空间。

我国大陆海岸线长度约为 $1.8 \times 10^4$  km,海岛海岸线长度约为 $1.4 \times 10^4$  km<sup>[27]</sup>,分布着热带、亚热带、暖温带、冷温带大型海藻,资源十分丰富。山东省沿海大型海藻资源非常丰富,广泛分布着马尾藻、海带、裙带菜、网地藻、紫菜、石莼、蜈蚣藻、石花菜、江蓠类等众多大型海藻,在山东省海岸带蓝汇中占据重要的地位。目前,庙岛群岛海域相关研究多集中于浮游生物<sup>[28]</sup>、底栖动物<sup>[29-30]</sup>等,对大型海藻的系统性研究缺乏。本研究对山东省庙岛群岛海藻场资源开展了系统调查,以摸清庙岛群岛海藻场分布情况,掌握海藻场的分布,大型海藻的种类、生物量等海藻资源信息

以及水环境等基本生态状况,分析各海藻场的优势种、物种丰富度、物种多样性、物种均匀度等群落特征。本研究以期弥补山东省海藻场现状,包括种类组成、优势种、生物量等相关基础数据的空白,为庙岛群岛海藻场碳汇估算等工作的开展提供数据和理论支持。

## 2 材料与方法

### 2.1 调查地点

庙岛群岛地处山东省北部,位于黄海、渤海交汇处,连接山东半岛和辽东半岛,由32个岛屿和25个岛礁组成,岛陆面积56 km<sup>2</sup>,海岸线长146.64 km<sup>[30]</sup>,生物资源丰富,是研究与保护生物多样性的理想区域。本研究对庙岛群岛的北隍城岛(2023年7月1日)、南隍城岛(2022年7月19日)、小钦岛(2023年7月1日)、大钦岛(2022年7月20日)、砣矶岛(2023年7月2日)、大黑山岛(2022年6月16日)、小黑山岛(2023年6月13日)、庙岛(2023年6月13日)、北长山岛(2023年6月12日)、南长山岛(2022年7月26日)10个有居民岛海域(图1)的海藻场资源展开了实地调查采样。

### 2.2 海藻场分布与面积调查

潮下带海藻场分布与面积通过现场潜水调查获取,具体如下:选择海上风浪小的天气,通过潜水人员游至海藻场边界和拐点处指导船只进行GPS定位。结合GPS定位边界等信息,绘制潮下带海藻场分布图,确定海藻场分布区域。

### 2.3 海水水质调查分析

使用YSI水质检测仪对各海藻场的海水温度、pH值、盐度、溶解氧进行现场测量,COD、营养盐、悬浮物等环境要素依据现行标准《海洋调查规范第4部分:海洋化学要素调查》(GB/T 12763.4—2007)<sup>[31]</sup>和《海洋监测规范第4部分:海水分析》(GB 17378.4—2007)<sup>[32]</sup>中海水样品的采集分析方法,每个采样区域设置3个采样点位,每个点位采集3份重复样品,合计9个重复( $n=9$ )。

### 2.4 海藻场植被调查

#### 2.4.1 大型海藻种类

依据海藻场分布面积设置3条垂直于岸边的断面,每条断面依据海藻场宽度设置近岸、中岸、远岸各3个站位,每个站位设置 $n=3$ 个(25 cm × 25 cm)重复样方,并对样方内的所有大型海藻进行采集,将所有大型海藻小心冲洗后按种类装入采样带,做好标识,冰鲜处理带回实验室进行传统形态学分类鉴定。

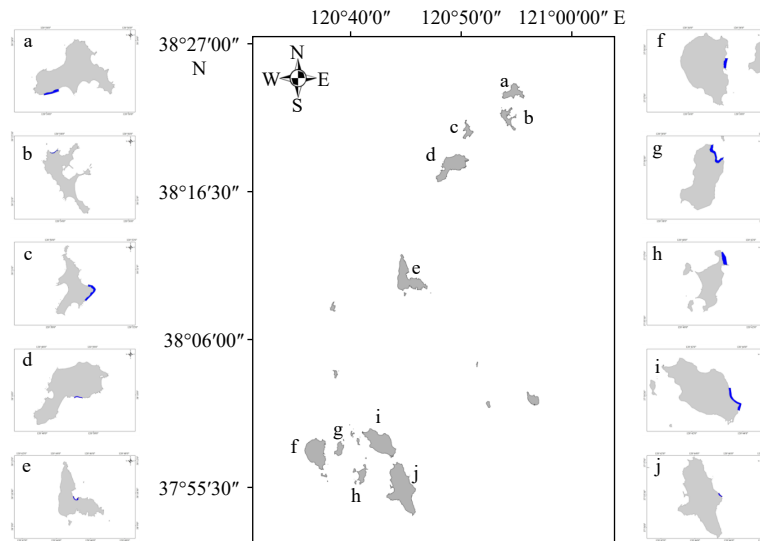


图 1 山东省庙岛群岛海藻场调查区域示意图(蓝色区域)

Fig. 1 Schematic map of the survey area of seaweed farms in Miaodao Archipelago, Shandong Province (the blue area)

a. 北隍城岛; b. 南隍城岛; c. 小钦岛; d. 大钦岛; e. 砣矶岛; f. 大黑山岛; g. 小黑山岛; h. 庙岛; i. 北长山岛; j. 南长山岛  
a. Beihuangcheng Island; b. Nanhuangcheng Island; c. Xiaoqin Island; d. Daqin Island; e. Tuoji Island; f. Daheishan Island; g. Xiaoheishan Island; h. Miaodao Island; i. Beichangshan Island; j. Nanchangshan Island

#### 2.4.2 生物量

采集样方内的所有大型海藻,装入样品袋,按采集断面、采集站位分别做好标识,低温(4℃)避光保存,带回实验室进行下一步分析。用吸水纸吸干藻体表面水分后称重,该重量除以样方面积即为大型海藻平均生物量(鲜重,  $\text{g}/\text{m}^2$ )。

#### 2.5 数据整理与分析

使用 Excel 2019 进行调查数据整理与分析, Graphpad Prism 8、ArcGIS 软件进行作图,使用 R 语言 (corrplot 包) 进行 pearson 相关性分析。

##### 2.5.1 优势度

通过计算大型海藻的优势度  $I$  来划分优势种, 计算公式为

$$I_i = \text{RB}_i \times \text{RF}_i, \quad (1)$$

$$\text{RB}_i = B_i / \sum B_i, \quad (2)$$

$$\text{RF}_i = F_i / \sum F_i, \quad (3)$$

式中,  $I_i$  为第  $i$  种海藻的优势度;  $\text{RB}_i$  为第  $i$  种海藻的相对生物量;  $B_i$  为第  $i$  种海藻的生物量;  $\text{RF}_i$  为第  $i$  种海藻的相对出现频率;  $F_i$  为第  $i$  种海藻的出现频率。

##### 2.5.2 Margalef 物种丰富度指数

$$R = (S - 1) / \ln N, \quad (4)$$

式中,  $R$  为大型海藻场物种丰富度指数;  $S$  为藻类种类数;  $N$  为藻类的生物量密度, 本文采用鲜重计算。它综合了样品的密度和种类数目信息, 表示一定密度中的物种种类数。

##### 2.5.3 Shannon-Wiener 物种多样性指数

$$H' = - \sum [(P_i) \times \ln P_i], \quad (5)$$

式中,  $H'$  为大型海藻场物种多样性指数;  $P_i$  为单位面积某种藻类生物量占总生物量的比例。  $H'$  值大小反映群落多样性的高低, 值越大, 多样性越高。它综合了群落丰富性和均匀性两方面因素的影响。

##### 2.5.4 Pielou 物种均匀度指数

$$E = H' / \ln S, \quad (6)$$

式中,  $E$  为大型海藻场物种均匀度指数;  $H'$  表示前式计算的物种多样性指数值,  $\ln S$  表示多样性指数的最大值。均匀度指数为群落中不同物种分布的均匀程度, 它是把物种丰富度与均匀度结合起来的一个单一的统计量。

##### 2.5.5 群落结构分析

使用 PRIMER 6.0 对大型海藻群落结构进行多元统计分析。首先对生物量数据进行方根转化, 为防止大型海藻生物量对结果权重产生影响。通过 Bray-Curtis 处理, 对其进行群落聚类分析 (CLUSTER) 及非度量多维尺度 (nMDS) 排序。使用 R 语言 (vegan 包) 对群落结构进行 Adonis 差异显著性检验。排序 (nMDS) 坐标轴用应力 (Stress) 表示, 当应力值小于 0.2 时, 表明矩阵具有反应相对真实结构的能力。

## 3 结果

### 3.1 物种组成

庙岛群岛 10 个居民岛海域的海藻场调查共采集到大型海藻 34 种 (表 1), 隶属 21 科、25 属。其中绿

表 1 山东庙岛群岛调查海域大型海藻名录  
Table 1 Directory of macroalgae in the survey area of Miaodao Archipelago, Shandong

种类组成		拉丁名	北隍城岛	南隍城岛	小钦岛	大钦岛	砣矶岛	大黑山岛	小黑山岛	庙岛	北长山岛	南长山岛
绿藻	石莼	<i>Ulva lactuca</i>	++	+		++	++			+	+++	+
	孔石莼	<i>Ulva pertusa</i>								++		
	礁膜	<i>Monostroma nitidum</i>									+	
	缘管浒苔	<i>Ulva linza</i>								+		
红藻	日本角叉菜	<i>Chondrus nipponicus</i>		++				++		+		
	石花菜	<i>Gelidium amansii</i>		++				+	+++	+++++	+++	+++
	节荚藻	<i>Lomentaria hakodatensis</i>						+			+	
	海萝	<i>Gloiopeltis furcata</i>		+								
	海柏	<i>Polyopes polyideoides</i>		+++			+		+	+++	+	
	鸭毛藻	<i>Symphyocladia latiuscula</i>		+							+++	
	凹顶藻	<i>Laurencia chinensis</i>		+								
	冈村凹顶藻	<i>Laurencia okamurai</i>									+	
	扇形拟伊藻	<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	+	+		+						
	蜈蚣藻	<i>Grateloupia filicina</i>				+						
	粗枝软骨藻	<i>Chondria crassicaulis</i>								+		
	凝菜	<i>Campylaephora crassa</i>										+
	角叉菜	<i>Chondrus ocellatus</i>	+									
	珊瑚藻	<i>Corallina officinalis</i>										+++
亮管藻	<i>Hyalosiphonia cawspitosa</i>									+++		
海膜	<i>Halymenia floresia</i>					+						
真江蓠	<i>Gracilaria vermiculophylla</i>									+		
扁江蓠	<i>Gracilaria textorii</i>							+	+++	+++		
褐藻	叉开网翼藻	<i>Dictyopteris divaricata</i>		+		+	+++	++	+	+++++	+++	+
	叉开网地藻	<i>Dictyota divaricata</i>									++	
	海带	<i>Saccharina japonica</i>	+++	++	++	++	++					
	裙带菜	<i>Undaria pinnatifida</i>		+	++	+++	+++				+	
	海黍子	<i>Sargassum muticum</i>	+	+	+		+	+		+++		+
	酸藻	<i>Desmarestia viridis</i>	++	+		+	+		+		++	
	囊藻	<i>Colpomenia sinuosa</i>					+				++	
	山东马尾藻	<i>Sargassum shandongense</i>		++							++	
	绳藻	<i>Chorda filum</i>										+
	海蒿子	<i>Sargassum pallidum</i>							++	+++++		
	铁钉菜	<i>Ishige okamurai</i>							+			
	铜藻	<i>Sargassum horneri</i>					++					

注:“+”代表采集到该种海藻,“+”数量代表采集到该种海藻的次数。

藻 4 种, 涉及 2 科、2 属, 占总种类数的 5.88%; 红藻 18 种, 涉及 11 科、15 属, 占总种类数的 52.94%; 褐藻 12 种, 涉及 8 科、8 属, 占总种类数的 38.24%。

### 3.2 海水水质

各海藻场海水水质调查结果如表 2 所示, 各海藻场调查取样期间温度变化范围在 15~23℃ 之间, 平均温度为 17.25℃, 最高出现在南长山岛, 最低温度为 大黑山岛和北隍城岛。各站位 pH 变化范围在 8.04~8.16 之间, 平均 pH 为 8.097, 最高同样出现在南长山岛, 最低则出现在庙岛。庙岛群岛海藻场盐度介于 29.68~31.45 之间, 平均值为 30.168, 最高位于南隍城岛, 最低则为大黑山岛。各大型海藻场溶解氧质量浓度差异较大, 介于 6.73~10.9 mg/L, 平均值为 8.53 mg/L, 最高位于南长山岛, 最低位于庙岛。各海藻场化学需氧量范围在 0.391~0.856 mg/L 之间,

平均值为 0.588 mg/L, 最高值出现在大黑山岛, 最低值出现在小钦岛和北隍城岛。各海藻场磷酸盐质量浓度介于在 0.001 3~0.026 5 mg/L 之间, 差异较大, 平均值为 0.008 5 mg/L, 最高位于大黑山岛, 是小钦岛调查水域的 20 倍。各海藻场硝酸盐-氮质量浓度范围介于 0.029~0.231 mg/L 之间, 差异较大, 平均值为 0.096 mg/L, 最高点位于大黑山岛, 小钦岛硝酸盐-氮质量浓度仅为其十分之一。总氮浓度范围为 0.131~0.460 mg/L, 平均值为 0.244 mg/L, 最低点位于小钦岛, 最高点位于大黑山岛。各海藻场总磷质量浓度介于 0.002 3~0.044 5 mg/L, 平均值为 0.015 2 mg/L, 最高出现在大黑山岛, 最低出现在小钦岛和砣矶岛。各海藻场悬浮物质量浓度介于 1.1~25.8 mg/L 之间, 平均值为 5.86 mg/L, 最低为砣矶岛, 最高为南长山岛。

表 2 庙岛群岛海藻场海水水质

Table 2 Seawater quality in Seaweed Farms of the Miaodao Archipelago

海藻场	温度/℃	pH	盐度	溶解氧/ (mg·L <sup>-1</sup> )	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	磷酸盐/ (mg·L <sup>-1</sup> )	硝酸盐-氮/ (mg·L <sup>-1</sup> )	总氮/ (mg·L <sup>-1</sup> )	总磷/ (mg·L <sup>-1</sup> )	悬浮物/ (mg·L <sup>-1</sup> )
北隍城岛	15±0.33	8.05±0.01	30.46±0.046	7.20±0.146	0.391±0.007	0.003 5±0.000 54	0.069±0.002 5	0.234±0.005 1	0.006 4±0.000 3	2.1±0.12
南隍城岛	20±0.75	8.11±0.02	31.45±0.080	8.38±0.189	0.800±0.022	0.008 0±0.000 59	0.059±0.002 0	0.305±0.005 7	0.015 3±0.000 4	4.0±0.13
小钦岛	15.5±0.52	8.08±0.01	30.33±0.027	7.60±0.216	0.391±0.006 0	0.001 3±0.000 14	0.029±0.001 3	0.131±0.003 0	0.002 3±0.000 1	1.5±0.07
大钦岛	20±0.95	8.15±0.03	30.89±0.050	10.4±0.238	0.621±0.014	0.012 5±0.000 56	0.084±0.002 3	0.201±0.004 1	0.022 2±0.000 5	3.0±0.12
砣矶岛	15.5±0.52	8.06±0.02	30.31±0.018	7.50±0.213	0.469±0.010	0.001 3±0.000 17	0.054±0.001 5	0.171±0.003 4	0.002 3±0.000 1	1.1±0.07
大黑山岛	15±0.41	8.12±0.03	29.68±0.033	9.00±0.183	0.856±0.022	0.026 5±0.000 66	0.231±0.004 1	0.460±0.006 8	0.044 5±0.000 5	12.5±0.23
小黑山岛	16.5±0.45	8.09±0.01	29.75±0.032	7.75±0.165	0.547±0.014	0.005 7±0.000 30	0.085±0.002 3	0.245±0.004 2	0.010 4±0.000 2	1.9±0.07
庙岛	17±0.60	8.04±0.02	29.72±0.03	6.73±0.205	0.586±0.015	0.003 5±0.000 26	0.117±0.002 2	0.302±0.005 1	0.006 4±0.000 1	5.0±0.14
北长山岛	17±1.21	8.07±0.01	29.83±0.033	8.03±0.420	0.625±0.017	0.003 5±0.000 62	0.120±0.002 4	0.275±0.004 5	0.006 4±0.000 2	1.7±0.07
南长山岛	23±0.79	8.16±0.03	29.71±0.025	10.9±0.15	0.699±0.021	0.013 8±0.000 22	0.148±0.002 3	0.321±0.005 4	0.026 3±0.000 5	25.8±0.43

注: 数据表示为“平均数±标准偏差”(n=9)。

### 3.3 生物量与物种数

各海藻场平均生物量如图 2 所示。其中, 海藻场平均生物量最高的为砣矶岛, 为 16 057.92 g/m<sup>2</sup>; 平均生物量最低的为大黑山岛, 仅有 284.56 g/m<sup>2</sup>。大钦岛、小黑山岛、小钦岛、北隍城岛、砣矶岛海藻场褐藻门海藻生物量占绝大部分, 南隍城岛、南长山岛、砣矶岛海藻场红藻门海藻平均生物量高于其他海藻场, 绿藻因为个体较小, 在本次调查中生物量占比最低。

各大型海藻场调查物种数如图 3 所示。北长山岛、南隍城岛、庙岛海藻场调查到的物种数较高, 小

钦岛、南长山岛海藻场调查物种数最低, 分别仅有 3、4 种。红藻门、褐藻门海藻种类较丰富, 而绿藻门海藻采集种类较少。

### 3.4 优势种

各海藻场调查优势种也有所不同。北隍城岛海藻场的优势种海藻为海带(优势度 0.190 8)和酸藻(优势度 0.046 6); 南隍城岛海藻场优势种为海带(优势度 0.025 1); 小钦岛海藻场的优势种海藻为裙带菜和海带, 其优势度分别为 0.247 1 与 0.115 4; 大钦岛海藻场的优势种为裙带菜和海带, 优势度分别为 0.125 3 与 0.089 4; 砣矶岛海藻场的优势种海藻为裙带菜和叉

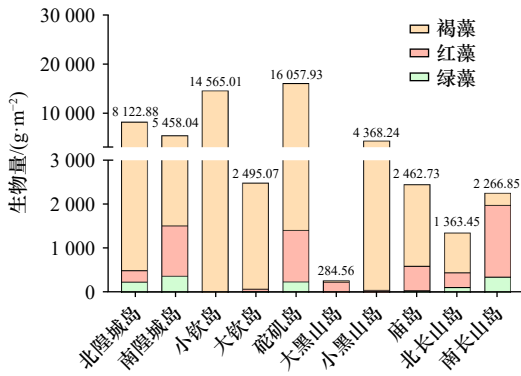


图2 庙岛群岛各海藻场调查平均生物量

Fig. 2 Average biomass of seaweed beds surveyed in the Miaodao Archipelago

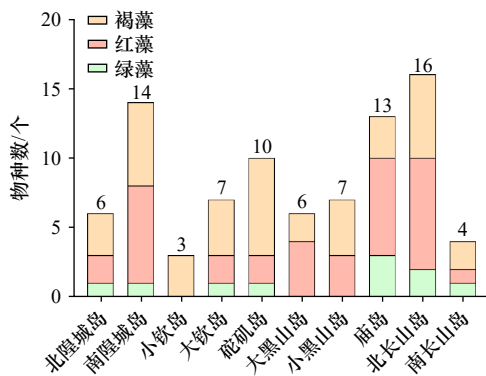


图3 庙岛群岛各海藻场调查物种数

Fig. 3 Species number of seaweed beds in the Miaodao Archipelago

开网翼藻,其优势度分别为0.0570与0.0316;大黑山岛海藻场优势种海藻为日本角叉菜和石花菜,优势度分别为0.1030与0.0239;小黑山岛的优势种海藻为海蒿子,优势度为0.1581;庙岛海藻场的优势种海藻为海蒿子(优势度0.0783)与石花菜(优势度0.0232);北长山岛的优势种海藻为叉开网翼藻,优势度为0.0261;南长山岛的优势种海藻为石花菜(优势度0.3584)和石莼(优势度0.0266)。

### 3.5 多样性指数

庙岛群岛各海藻场物种丰富度指数介于0.209~2.078之间,平均物种丰富度指数为0.957(表3)。物种丰富度指数最高的为北长山岛(2.078),其次为庙岛(1.537)和南隍城岛(1.511)。物种丰富度指数最低的海藻场为小钦岛(0.209),南长山岛海藻场(0.388)物种丰富度指数略高于小钦岛。庙岛群岛海藻场物种多样性指数介于0.248~2.119之间,平均物种多样性指数为1.230。最高点出现在南隍城岛(2.119),最低点为小黑山岛海藻场(0.248)。北长山岛(1.851)、砣矶岛(1.782)、庙岛(1.495)海藻场的物种多样性指数也较高。庙岛群岛海藻场物种均匀度指最低的为

表3 庙岛群岛各海藻场多样性指数

Table 3 Diversity Indices of Seaweed Beds in the Miaodao Archipelago

多样性指数	种类数 (S)	生物量密度 (N)	物种丰富度指数 (R)	多样性指数 (H')	均匀度指数 (E)
北隍城岛	6	8212.88	0.555	1.043	0.582
南隍城岛	14	5458.04	1.511	2.119	0.803
小钦岛	3	14565.01	0.209	0.878	0.799
大钦岛	7	2495.07	0.767	0.916	0.471
砣矶岛	10	16057.93	0.929	1.782	0.774
大黑山岛	6	284.56	0.885	1.133	0.632
小黑山岛	7	4368.24	0.714	0.248	0.128
庙岛	13	2462.73	1.537	1.495	0.583
北长山岛	16	1363.45	2.078	1.851	0.667
南长山岛	4	2266.85	0.388	0.839	0.605

小黑山岛,均匀度指数仅为0.128,平均均匀度指数为0.604。均匀度指数最高的海藻场为南隍城岛,小钦岛(0.799)和砣矶岛(0.774)次之。

### 3.6 聚类与 nMDS 分析

Cluster 聚类分析结果如图 4a 所示,在相似性 20% 的水平上,10 个海藻场聚为 2 支,分别为南五岛(南长山岛、北长山岛、庙岛、大黑山岛、小黑山岛)和北五岛(砣矶岛、大钦岛、小钦岛、南隍城岛、北隍城岛)。Adonis 分析结果表明,南、北五岛大型海藻群落结构具有显著性差异( $P = 0.01$ )。其中,南隍城岛与北隍城岛、小钦岛与砣矶岛、小黑山岛与庙岛在 40% 的相似性水平上分别聚为一支,能够充分的解释地理位置对大型海藻群落结构的影响。

非度量多维尺度分析(nMDS)结果如图 4b 所示,其二维排序图的应力值为 0.1,对不同地理位置的大型海藻群落结构的相似性具有较好的解释意义。聚类的分支中相邻岛屿聚在一起,表明相似度较高,排序结果与聚类分析结果一致。

### 3.7 海水水质与大型海藻群落结构相关性分析

如图 5 所示,各大型海藻场生物量与化学耗氧量、硝酸盐、总氮质量浓度成显著负相关( $P < 0.05$ )。化学耗氧量(COD)是衡量水体中有机物与无机物被氧化的能力的一种指标,反映了水体的受污染程度。值越高,表明水体受污染程度越严重。在自然环境中,硝酸盐、磷酸盐质量浓度升高会促进大型海藻的生长。本调查时间处于夏季,随着温度升高,大型海藻开始进入衰败期,细胞、组织死亡会向周围海

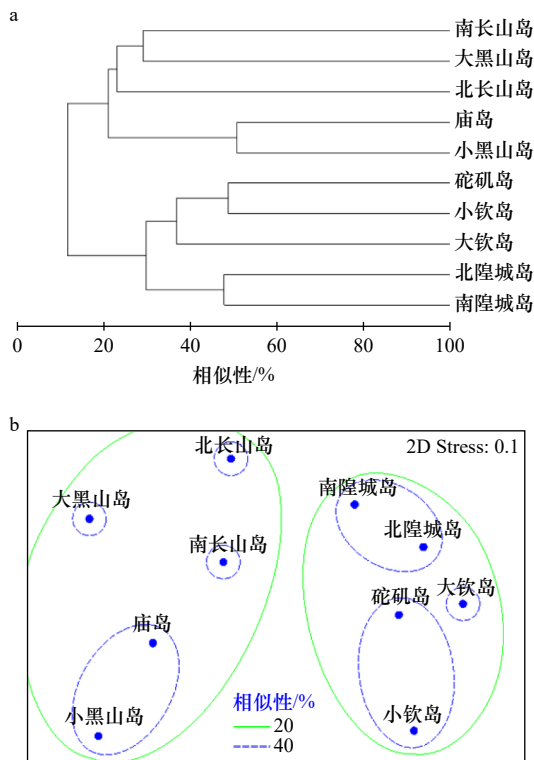


图 4 庙岛群岛海藻场聚类(a)及 nMDS 分析(b)

Fig. 4 Cluster analysis (a) and nonmetric multidimensional scale analysis (nMDS, b) of seaweed beds in Miaodao Archipelago

水中释放大量的有机物,这些含氮有机物质被海洋微生物等分解会提高近岸海水的硝酸盐、总氮质量浓度。物种丰富度与物种多样性呈显著正相关。

## 4 讨论

本研究对庙岛群岛各海藻场调查共采集到大型海藻 34 种。其中红藻门 15 属 18 种;绿藻门 2 属 4 种;褐藻门 8 属 12 种,表明庙岛群岛海域潮下带海藻场的海藻群落结构比较丰富。总体上来看,在庙岛群岛不同居民岛的调查中,红藻门海藻的种类数占据优势地位,该结果与庄树宏和陈礼学<sup>[33]</sup>的烟台月亮湾大型海藻群落结构、唐伟尧<sup>[34]</sup>在威海西港的大型海藻群落结构和彭欣等<sup>[35]</sup>在浙南潮间带大型海藻群落结构的调查结果相似。

不同地理位置海藻场生物量存在差异。首先,海洋底质类型决定着大型海藻的生物量和群落结构,大型海藻通过假根附着在礁石基质生活,而泥沙底质由于附着条件差且稳定性较低,藻类种类通常较少<sup>[36]</sup>。其次,藻场的平均生物量与群落中的海藻种类密切相关。褐藻门海藻具有个体大的特点,如成熟海带可生长至 3 m,马尾藻属海藻铜藻、海黍子等可生长至 3~5 m,通常在单位面积内具有较高的生物量<sup>[37]</sup>。沿

海大型海藻生物量还受营养盐浓度调控<sup>[38]</sup>,研究表明 *Ulva* spp.海藻生长速率与 DIN 浓度呈正相关,而 DIN 处于较高水平时则受磷的供应量控制<sup>[39]</sup>。温度同样影响大型海藻的生物量,夏季末的相对高温会诱导各大型海藻进入衰败期,例如温度高于 25℃ 时,铜藻、石莼等会出现停止生长并腐烂的现象<sup>[40-41]</sup>,最终导致采集海藻生物量偏低。在本研究中海藻生物量与化学耗氧量、硝酸盐、总氮呈负相关趋势,推测邻近海域的养殖生产活动可能对沿海水体产生影响,进而对藻场健康造成不利影响。研究表明,高 COD 进一步引发的近岸缺氧会抑制近岸生态系统正常结构<sup>[42]</sup>,包括大型海藻的生长。此外,此季节棘皮动物以及鱼类等啃食海藻<sup>[40,43]</sup>,以及人为采集<sup>[37]</sup>同样也会降低大型海藻的生物量。

不同调查区域海藻场优势种类也有所不同,如南五岛多以石花菜、日本角叉菜等红藻门为主,而北五岛则以海带、裙带菜等褐藻门为主。这种不同岛屿优势种类的差异与威海双岛礁区<sup>[44]</sup>和崂山湾<sup>[45]</sup>大型海藻群落结构研究的结果一致。不同海藻场之间也存在部分相同的优势种,如海带在小钦岛和北隍城岛优势度有所不同,表明其在海藻群落中的功能地位存在一定的差异。同样,许多种类在不同的海藻场群落中均被采集到,但它们在群落中扮演的角色和发挥的作用亦存在明显的差异。如叉开网翼藻在除小钦岛和北隍城岛外均被采集,但仅在北长山岛和砣矶岛为优势种,而在其他海藻场作为伴生种存在。推测其原因可能在于该物种广泛分布于山东、辽宁沿海,而在特殊的条件下,如无摄食压力或营养物质充足等环境,在竞争中脱颖而出,成为优势种。受光质、底质类型以及营养盐利用策略影响,不同区域海藻场优势种也有所不同<sup>[46-47]</sup>。褐藻适宜生长在水质状况良好的浅海区域<sup>[48]</sup>;而红藻具有更强的蓝紫光吸收能力,随着水深增加、光照减弱,使得其在弱光的较深水域依旧可以生存<sup>[49]</sup>。也正是由于这种环境因子的差异,导致南五岛优势种以石花菜等红藻为主,而北五岛则是体型高大的海带、裙带菜等褐藻占优势地位。

不同调查区域海藻场物种丰富度指数、多样性指数、均匀度指数存在差异。海藻群落在种类组成、功能、结构上产生的分化能够通过多样性指数表现<sup>[33]</sup>。物种多样性指数和丰富度指数通常与种类数呈正相关,但一块礁石上通常仅附着一种或几种藻类,使得有限的样方框内采集到的种类相对单一,难以涵盖该断面全部藻类,导致物种多样性结果偏低。尤其在北五岛以大型褐藻为优势种的海藻场,其优势度与平均

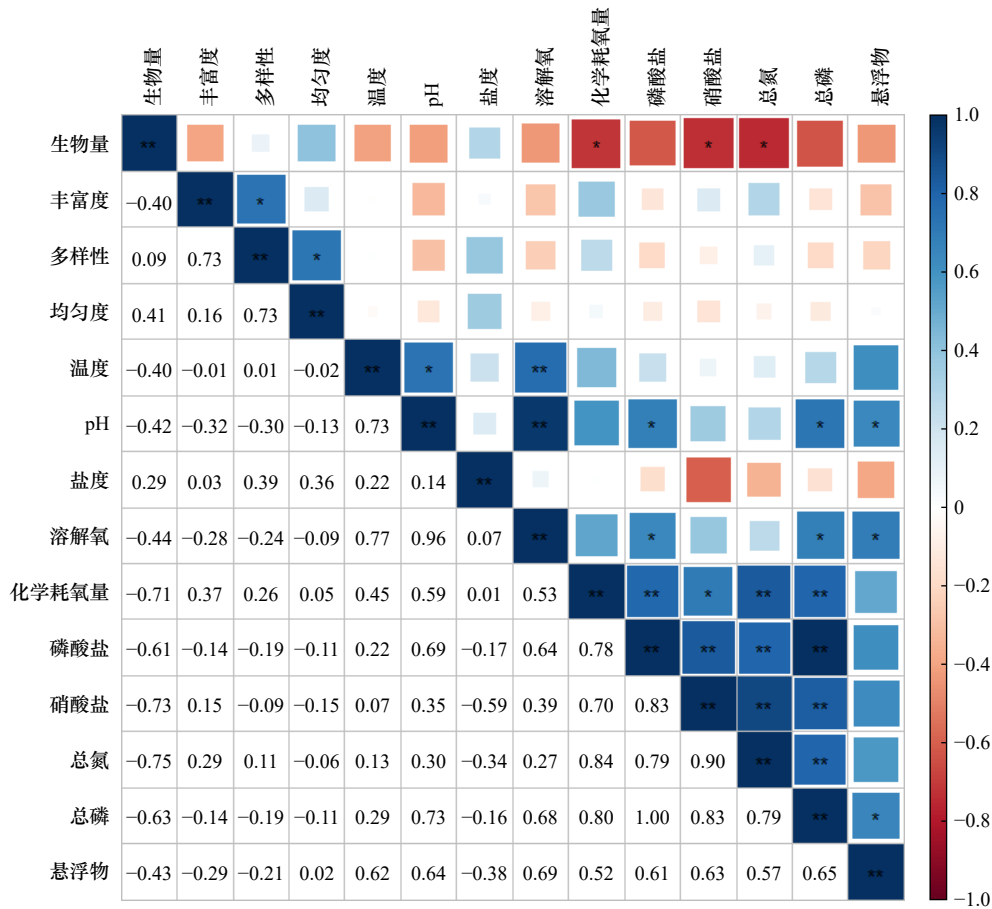


图5 庙岛群岛海藻场大型海藻群落结构与海水水质相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between macroalgae community structure and seawater quality in seaweed beds of Miaodao Archipelago

生物量显著高于其他物种,导致其群落物种多样性与均匀度指数较低。但在营养盐充足条件下,某些机会主义藻类会快速生长,也会导致物种多样性降低以及抗风险能力下降<sup>[21]</sup>。

庙岛群岛海藻场群落结构在地理位置上存在显著差异。南、北五岛在物种组成、生物量、优势种和生物多样性等方面存在的差异也验证了这一点。有研究表明,地理位置、营养盐条件、光照、人为活动等因素均能影响底栖海藻的群落结构<sup>[35, 37, 50-51]</sup>。在相同的时间尺度上,北五岛因纬度高于南五岛,水温较低,更适宜低温种如海带、裙带菜的生长,这可能是造成群落结构差异的重要原因。还有研究表明,不同海藻群落之间的差异性可能由少数几种特定的大型海藻物种所决定<sup>[44-45]</sup>。本研究中,南、北五岛在优势种门类上出现明显分化,这种差异推测受底质类型、人为活动等影响。北五岛调查区域底质类型多为大块礁石,南五岛以碎石及泥沙底为主的格局,大块礁石为大型褐藻提供良好的附着基,而沉积物的增加以及浊度上升则会抑制其定殖,反而更适宜草皮藻

类的生长<sup>[52]</sup>。本研究中,藻场生物量与化学耗氧量、氮磷浓度显著负相关,而生物量较低的大黑山岛海藻场临近生产加工区域,环境调查数据也显示化学耗氧量最高,这可能会对优势种海藻生物量造成负面影响,导致大型海藻群落退化<sup>[53]</sup>。室内与原位研究均表明大型海藻衰败过程中会向水体中释放无机营养盐,该释放速率还受物种、温度与其他环境因子影响<sup>[54]</sup>。例如温度升高导致瓦氏马尾藻碎屑释放氨氮速率升高,光强越强则抑制正磷酸盐释放<sup>[55]</sup>。而南、北隍城岛位于庙岛群岛最北端,岛上居住人群少,环境数据显示受到人类活动影响相对较小,因而海藻平均生物量较高。

## 5 结论

本研究对庙岛群岛10个居民岛潮下带海藻场进行了海藻资源调查,共采集到大型海藻34种,隶属21科、25属。调查结果显示庙岛群岛南、北五岛海藻场群落结构存在显著差异,这种差异受温度、营养盐浓度、底质类型、人为活动等影响。北五岛优势种

中低温种的褐藻居多,表明该区域海藻场结构较为稳定。本研究弥补了近些年山东省海藻资源现状相关基础数据的空白,为山东省海藻场碳汇评价提供了重要的数据支持和理论参考。

#### 参考文献:

- [1] 吴祖立,崔雪森,唐峰华,等.大型底栖海藻种群生态学研究概述[J].*渔业信息与战略*,2018,33(1):36-44.  
Wu Zuli, Cui Xuesen, Tang Fenghua, et al. Research on genecology of benthic macroalgae[J]. *Fishery Information & Strategy*, 2018, 33(1): 36-44.
- [2] Littler M M, Arnold K E. Primary productivity of marine macroalgal functional-form groups from southwestern North America[J]. *Journal of Phycology*, 1982, 18(3): 307-311.
- [3] Jard G, Marfaing H, Carrère H, et al. French Brittany macroalgae screening: composition and methane potential for potential alternative sources of energy and products[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 144: 492-498.
- [4] 章守宇,刘书荣,周曦杰,等.大型海藻生境的生态功能及其在海洋牧场应用中的探讨[J].*水产学报*,2019,43(9):2004-2014.  
Zhang Shouyu, Liu Shurong, Zhou Xijie, et al. Ecological function of seaweed-formed habitat and discussion of its application to sea ranching[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 2004-2014.
- [5] Wernberg T, Krumhansl K, Filbee-Dexter K, et al. Status and trends for the world's kelp forests[M]//Sheppard C. *World Seas: An Environmental Evaluation*. 2nd ed. London: Academic Press, 2019: 57-78.
- [6] Li Xunmeng, Wang Kai, Zhang Shouyu, et al. Distribution and flora of seaweed beds in the coastal waters of China[J]. *Sustainability*, 2021, 13(6): 3009.
- [7] 胡闪闪.广东省海域大型海藻对海洋化学环境变化的响应及其生态服务价值评估[D].广州:华南理工大学,2022.  
Hu Shanshan. Study on the responses to marine chemical environment changes and the evaluation of ecological services of marine macroalgae in the waters of Guangdong Province, China[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [8] 张水浸.中国沿海海藻的种类与分布[J].*生物多样性*,1996,4(3):139-144.  
Zhang Shuijin. The species and distribution of seaweeds in the coast of China seas[J]. *Chinese Biodiversity*, 1996, 4(3): 139-144.
- [9] 王先磊,杨俊杰,赵中华,等.基于专利分析的我国大型海藻开发技术研究[J].*海洋开发与管理*,2021,38(2):30-35.  
Wang Xianlei, Yang Junjie, Zhao Zhonghua, et al. Study on macroalgae development technology in China based on patent analysis[J]. *Ocean Development and Management*, 2021, 38(2): 30-35.
- [10] Polat S, Trif M, Rusu A, et al. Recent advances in industrial applications of seaweeds[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(21): 4979-5008.
- [11] Geddie A W, Hall S G. Development of a suitability assessment model for the cultivation of intertidal macroalgae in the United States[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134327.
- [12] Li Jingyu, Murauchi Y, Ichinomiya M, et al. Seasonal changes in photosynthesis and nutrient uptake in *Laminaria japonica* (Laminariaceae; Phaeophyta)[J]. *Aquaculture Science*, 2007, 55(4): 587-597.
- [13] Zou Dinghui, Gao Kunshan. Temperature response of photosynthetic light- and carbon-use characteristics in the red seaweed *Gracilariopsis lemaneiformis* (Gracilariiales, Rhodophyta)[J]. *Journal of Phycology*, 2014, 50(2): 366-375.
- [14] Krause-Jensen D, Duarte C M. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(10): 737-742.
- [15] 陈亮然,章守宇,陈彦,等.枸杞岛马尾藻场铜藻的生命史与形态特征[J].*水产学报*,2015,39(8):1218-1229.  
Chen Liangran, Zhang Shouyu, Chen Yan, et al. Life history and morphology of *Sargassum horneri* from the *Sargassum* seaweed bed of Gouqi Island[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(8): 1218-1229.
- [16] Starko S, Smyth C, Kucera H. Attachment strength of the herbivorous rockweed isopod, *Idotea wosnesenskii* (Isopoda, Crustacea, Arthropoda), depends on properties of its seaweed host[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2016, 477: 1-6.
- [17] Chemello R, Milazzo M. Effect of algal architecture on associated fauna: some evidence from phytal molluscs[J]. *Marine Biology*, 2002, 140(5): 981-990.
- [18] Christie H, Jørgensen N M, Norderhaug K M, et al. Species distribution and habitat exploitation of fauna associated with kelp (*Laminaria Hyperborea*) along the Norwegian Coast[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2003, 83(4): 687-699.
- [19] Smale D A. Impacts of ocean warming on kelp forest ecosystems[J]. *New Phytologist*, 2020, 225(4): 1447-1454.
- [20] Krause-Jensen D, Sagert S, Schubert H, et al. Empirical relationships linking distribution and abundance of marine vegetation to eutrophication[J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8(5): 515-529.
- [21] Hardison A K, Canuel E A, Anderson I C, et al. Microphytobenthos and benthic macroalgae determine sediment organic matter composition in shallow photic sediments[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(8): 5571-5588.
- [22] Filbee-Dexter K, Wernberg T. Rise of turfs: a new battlefield for globally declining kelp forests[J]. *BioScience*, 2018, 68(2): 64-76.
- [23] Yamamoto M, Fukushima M, Liu Dan. The effect of humic substances on iron elution in the method of restoration of seaweed beds using steelmaking slag[J]. *ISIJ International*, 2012, 52(10): 1909-1913.

- [24] 孙建璋, 庄定根, 王铁杆, 等. 南麂列岛铜藻场建设设计与初步实施[J]. 现代渔业信息, 2009, 24(7): 25–28.  
Sun Jianzhang, Zhuang Dinggen, Wang Tiegang, et al. Design and primary enforcement of *Sargassum horneri* ground establishment around Nanji Islands[J]. Modern Fisheries Information, 2009, 24(7): 25–28.
- [25] 孙建璋, 庄定根. 南麂海藻资源状况堪忧[J]. 现代渔业信息, 2008, 23(12): 30–31.  
Sun Jianzhang, Zhuang Dinggen. Worry about seaweed resources around Nanji Islands[J]. Modern Fisheries Information, 2008, 23(12): 30–31.
- [26] 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.
- [27] Wu Jiaping, Zhang Haibo, Pan Yiwen, et al. Opportunities for blue carbon strategies in China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2020, 194: 105241.
- [28] 王玮云, 何健龙, 付萍, 等. 庙岛群岛海域浮游植物群落年际变化及与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2022, 29(7): 1002–1012.  
Wang Weiyun, He Jianlong, Fu Ping, et al. Interannual variation of the phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Miaodao Archipelago waters[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(7): 1002–1012.
- [29] 纪莹璐, 陈琳琳, 李奇, 等. 基于环境 DNA 宏条形码技术的庙岛群岛海域大型底栖动物多样性研究[J]. 海洋科学进展, 2025, 43(4): 840–855.  
Ji Yinglu, Chen Linlin, Li Qi, et al. Diversity of macrobenthos in the waters of the Miaodao Archipelago based on environmental DNA metabarcoding technology[J]. Advances in Marine Science, 2025, 43(4): 840–855.
- [30] 张悦, 于国旭, 徐勇, 等. 夏季庙岛群岛大型底栖动物群落特征[J]. 海洋科学, 2023, 47(7): 96–110.  
Zhang Yue, Yu Guoxu, Xu Yong, et al. Community characteristics of macrozoobenthos in the Miaodao Archipelago in summer[J]. *Marine Sciences*, 2023, 47(7): 96–110.
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.4—2007, 海洋调查规范 第 4 部分: 海水化学要素调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.4—2007, Specifications for oceanographic survey—Part 4: survey of chemical parameters in sea water[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.4—2007, 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.4—2007, The specification for marine monitoring—Part 4: seawater analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [33] 庄树宏, 陈礼学. 烟台月亮湾岩岸潮间带底栖海藻群落结构的季节变化[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2003, 33(5): 719–726.  
Zhuang Shuhong, Chen Lixue. Seasonal fluctuation of benthic algal community in the rocky intertidals of moon bay, Yantai[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(5): 719–726.
- [34] 唐伟尧. 威海西港人工鱼礁区大型底栖藻类季节性变化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.  
Tang Weiyao. Artificial reef area large benthic algae seasonal changes in Xigang, Weihai[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [35] 彭欣, 谢起浪, 李尚鲁, 等. 浙南潮间带大型底栖藻类时空分布及多样性研究[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(3): 135–140.  
Peng Xin, Xie Qilang, Li Shanglu, et al. Study on spatiotemporal distribution of intertidal benthic macro-algae and their diversity in southern Zhejiang Province[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(3): 135–140.
- [36] 曾宴平, 马家海, 陈斌斌, 等. 浙江省枸杞岛潮间带大型底栖海藻群落的研究[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(5): 1096–1102.  
Zeng Yanping, Ma Jiahai, Chen Binbin, et al. Survey on the community of benthic macro-algae in Gouqi island of Zhejiang Province[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2013, 25(5): 1096–1102.
- [37] 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.  
Chen Ziqiang, Shou Lu, Liao Yibo, et al. Community structure of benthic algae and its seasonal variation in the rocky intertidal zone of Sanya[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(11): 3370–3382.
- [38] Hillebrand H, Kahlert M. Effect of grazing and nutrient supply on periphyton biomass and nutrient stoichiometry in habitats of different productivity[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(8): 1881–1898.
- [39] Teichberg M, Fox S E, Olsen Y S, et al. Eutrophication and macroalgal blooms in temperate and tropical coastal waters: nutrient enrichment experiments with *Ulva* spp.[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(9): 2624–2637.
- [40] Zheng Xinqing, Huang Lingfeng, Wang Qian, et al. Amphipods fail to suppress the accumulation of *Ulva lactuca* biomass in eutrophic Yundang Lagoon[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(12): 155–162.
- [41] 栾青, 吕芳, 吴海一, 等. 不同培养条件对铜藻生长和营养组分的影响[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(4): 123–130.  
Luan Qing, Lü Fang, Wu Haiyi, et al. Effects of culture conditions on nutrient composition of *Sargassum horneri*[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(4): 123–130.
- [42] Levin L A, Ekau W, Gooday A J, et al. Effects of natural and human-induced hypoxia on coastal benthos[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(10): 2063–2098.

- [43] Hamilton S L, Gleason M G, Godoy N, et al. Ecosystem-based management for kelp forest ecosystems[J]. *Marine Policy*, 2022, 136: 104919.
- [44] 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.  
Liu Guoshan. The succession and ecological functions of macrobenthos and macroalgae in the artificial reef zone of Shuangdao Bay, Weihai[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [45] 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.  
Sheng Huaxiang. Seasonal and regional variations of the benthic macroalgae community in the artificial reef area of Laoshan Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [46] Thoralf F, Pinkerton M H, Tait L W, et al. Spectral light quality on the seabed matters for macroalgal community composition at the extremities of light limitation[J]. *Limnology and Oceanography*, 2023, 68(4): 902–916.
- [47] 李文涛, 王欢, 仲崇凤, 等. 山东荣成马山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.  
Li Wentao, Wang Huan, Zhong Chongfeng, et al. Spatial and temporal variations in the benthic macroalgal communities along the Mashanli coast of Rongcheng, Shan-dong Province, China[J]. *Marine Sciences*, 2022, 46(5): 74–85.
- [48] Ruiz Martínez E, Schroeder D C, Thuestad G, et al. Brown algae (Phaeophyceae) stressors and illnesses: a review for a sustainable aquaculture under climate change[J]. *Frontiers in Aquaculture*, 2024, 3: 1390415.
- [49] Voerman S E, Ruseckas A, Turnbull G A, et al. Red algae acclimate to low light by modifying phycobilisome composition to maintain efficient light harvesting[J]. *BMC Biology*, 2022, 20(1): 291.
- [50] 林清菁, 蒋霞敏, 徐镇, 等. 崂山列岛潮间带大型海藻群落结构的季节变化[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(9): 2350–2355.  
Lin Qingjing, Jiang Xiamin, Xu Zhen, et al. Seasonal changes of macroalgae community structure in intertidal zone of Shengsi Archipelago, East China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(9): 2350–2355.
- [51] Helsing-Lewis M L, Hacker S D, Menge B A, et al. Context-dependent eelgrass–macroalgae interactions along an estuarine gradient in the Pacific Northwest, USA[J]. *Estuaries and Coasts*, 2011, 34(6): 1169–1181.
- [52] Thomsen M S, McGlathery K J. Stress tolerance of the invasive macroalgae *Codium fragile* and *Gracilaria vermiculophylla* in a soft-bottom turbid lagoon[J]. *Biological Invasions*, 2007, 9(5): 499–513.
- [53] Gao Li, Zhang Luhua, Hou Jinzhi, et al. Decomposition of macroalgal blooms influences phosphorus release from the sediments and implications for coastal restoration in Swan Lake, Shandong, China[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 60: 19–28.
- [54] Liu Zhangbin, Chen Jianqu, Zhang Jian, et al. The evaluation of C, N, P release and contribution to the aquatic environment during *Sargassum* litters biomass decay[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2024, 80: 103892.
- [55] 邹敏, 章守宇, 周曦杰. 温度和光照强度对海藻场瓦氏马尾藻碎屑分解的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(2): 428–435.  
Zou Min, Zhang Shouyu, Zhou Xijie. The influence of temperature and light intensity on *Sargassum vachellianum* detritus decomposition[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(2): 428–435.

## Analysis of the community structure characteristics of seaweed beds in the Miaodao Archipelago

Li Baoqi<sup>1,2</sup>, Chen Weizhou<sup>2</sup>, Wang Ning<sup>3</sup>, Jiang Huichao<sup>3</sup>, Zhuang Mingkun<sup>1</sup>,  
Lv Zhengzheng<sup>1</sup>, Zhang Qi<sup>1</sup>, Guo Xiaoxi<sup>1</sup>, Xu Zhiguang<sup>1</sup>

(1. School of Life Sciences, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. Institute of Marine Biology, Shantou University, Shantou 515063, China; 3. Shandong Marine Resources and Environment Research Institute, Yantai 264006, China)

**Abstract:** The Miaodao Archipelago in Shandong Province are rich in seaweed resources and hold great potential for nearshore marine carbon sinks. However, fundamental data and research related to the seaweed beds in this region remain scarce, which restricts the calculation and evaluation to carbon sink of seaweed beds. Therefore, this study aimed to complement the gap in baseline information regarding seaweed beds in the Miaodao Archipelago. In this study, 10 residential islands of Miaodao archipelago in Shandong Province were selected and the distribution of seaweed fields in the subtidal zone was investigated and sampled by scuba diving. Seaweed resource information in the seaweed beds, including the distribution and area of seaweed beds, species composition, biomass, dominant species, and community diversity, was identified and counted, and then combined with the environmental context, the

community structure characteristics of the seaweed beds in the 10 islands were clustered. A total of 34 species of macroalgae were collected, belonging to 21 families and 25 genera. Among them were 18 species of red algae (11 families, 15 genera), 4 species of green algae (2 families, 2 genera), and 12 species of brown algae (8 families, 8 genera). The dominant macroalgal species in the region included *Saccharina japonica*, *Undaria pinnatifida*, *Sargassum muticum*, *Gelidium amansii*, *Chondrus nipponicus*, *Ulva lactuca*, *Dictyopteris divaricata*, *Sargassum pallidum*, and *Desmarestia viridis*. The results of statistical analysis revealed that Tuoji Island and Xiaoqin Island had relatively high biomass density. Nouth Changshan Island exhibited the highest species richness, followed by Miao Island and South Huangcheng Island. South Huangcheng Island had the highest diversity index, with Nouth Changshan Island and Tuoji Island ranking next, and also showed the highest evenness index among the surveyed sites. Cluster analysis results indicated significant differences in community structure between the five southern islands (South Changshan Island, North Changshan Island, Miaodao Island, Daheishan Island, Xiaoheishan Island) and the five northern islands (Tuoji Island, Daqin Island, Xiaoqin Island, South Huangcheng Island, North Huangcheng Island), mainly due to geographic variation. This study helps complement the gap in baseline information regarding seaweed beds in Shandong Province, thus providing essential data for the carbon sink evaluation and theoretical support for development of nearshore blue carbon sink of seaweed beds in Shandong Province.

**Key words:** Miaodao Archipelago; macroalgae; species diversity; dominant species