



## 枸杞岛贻贝养殖筏架附着海藻的群落结构

章守宇<sup>1</sup>, 崔 潇<sup>1</sup>, 汪振华<sup>1</sup>, 王 凯<sup>1\*</sup>,  
程晓鹏<sup>1</sup>, 刘书荣<sup>2</sup>, 沈 慧<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 上海交通大学海洋学院, 上海 200204)

**摘要:** 为了解贝类筏式养殖区的大型海藻种类组成和分布格局及季节变动等群落水平的特征, 实验于2018年春季(5月)、夏季(8月)、秋季(11月)和2019年冬季(2月)对枸杞岛贻贝养殖筏架上的附着海藻进行采样和分析。结果显示, 全年共采集到49种附着海藻, 隶属11目20科33属。在物种数季节变化上, 秋季最高(29种), 春季最低(20种), 平均有23种; 平均生物量季节变化上, 夏季最高(5529.40 g/m<sup>2</sup>), 秋季最低(2340.45 g/m<sup>2</sup>), 年平均值为(3455.06±1480.40) g/m<sup>2</sup>; 平均物种数和平均生物量在水平分布上均呈现从养殖区内侧至外侧逐渐减少的特点; 附着海藻多样性指数(*H'*)最高为秋季(2.30), 最低为夏季(1.87), 年平均值为2.07±0.18; 全年共采集到优势海藻13种, 最高是秋季(8种), 夏季最低(5种), 平均有6种, 其中宽角叉珊藻和密毛沙菜是养殖筏架上的全年优势种; 优势海藻的生态位宽度最大值与最小值均出现在秋季, 分别为密毛沙菜(2.21)和铜藻(0.74); 生态位重叠最大值与最小值均出现在秋季, 分别是扁江蓠-铜藻(0.86)和带形蜈蚣藻-铜藻(0)。研究表明, 大规模筏式养殖的存在, 延长了舌状蜈蚣藻、密毛沙菜等红藻的生长期, 拓宽了铜藻等褐藻的栖息范围, 从而改变了养殖区内大型海藻的群落结构, 有利于所在海区维持更高的全年初级生产力水平和海藻碎屑产生量, 为海洋牧场建设过程中海藻场的营造提供科学依据。

**关键词:** 海藻场; 附着海藻; 季节变化; 分布特征; 物种多样性; 生态位

**中图分类号:** S 917.3

**文献标志码:** A

大型海藻作为海洋初级生产力的重要来源之一, 驱动着整个近岸海洋生态系统生态过程, 在调节海洋环境、维持海洋生物生命活动、优化海洋生态系统结构等方面发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。大型海藻通常分布于潮间带及潮下带的透光层, 但随着筏式养殖等人类经济活动的开展, 经济海藻、贝类等养殖筏架往往伴生了各种大型海

藻, 共同形成了规模庞大的海洋表层生产力系统, 局部海域的生产力和生物量甚至超过天然底栖海藻场<sup>[3-5]</sup>。另外, 养殖筏架区的大型海藻除了可以改善水质环境, 在物质循环和能量流动过程中也发挥着重要作用。一方面, 大型海藻上附生的端足类动物、环节动物和节肢动物等饵料生物, 为褐菖鲉 (*Sebastes marmoratus*)

收稿日期: 2020-05-09 修回日期: 2020-07-18

资助项目: 蓝色粮仓海洋牧场重点专项(2019YFD0901303); 国家自然科学基金(41876191); 藻类产业技术体系专项资金(CARS-50)

第一作者: 章守宇(照片), E-mail: syzhang@shou.edu.cn

通信作者: 王凯, E-mail: kwang@shou.edu.cn



等鱼类幼体提供了摄食和栖息场所<sup>[6-7]</sup>; 另一方面, 藻体及其凋落物直接保障了海区内游泳动物和底栖碎屑食性动物的饵料供应<sup>[8-9]</sup>。因此, 探明贝类养殖筏架区大型海藻的群落结构特征, 比较其与天然藻场在生态功能与效能上的差异, 可为海洋牧场建设与人工筏式生境的构建提供参考。

枸杞岛地处长江口东南侧外海、浙江省嵊泗县马鞍列岛东部海域, 常年水体透明度较高, 且受长江冲淡水等影响, 营养盐丰富<sup>[10-11]</sup>, 这些优良条件支撑起了长江口外侧的贻贝养殖。早在2001年枸杞岛就被授予“贻贝之乡”, 且养殖面积逐年增加<sup>[12-13]</sup>, 如此形成的大规模养殖筏架占据了岛礁海域较大的上层水体空间, 且其不随潮汐变化而干出<sup>[5]</sup>。养殖筏架为周边潮间带底栖海藻的繁殖拓展了大量附着基质, 并创造了适宜海藻生长的微环境<sup>[11]</sup>。目前已有围绕贻贝养殖区大型海藻生态功效的研究, 包括鱼类、藻栖类生物对附着海藻的利用<sup>[6-7]</sup>、附着海藻对养殖区内营养盐分布的影响<sup>[14]</sup>等, 但贻贝养殖筏架附着的大型海藻群落结构、物种多样性和种间关系却鲜有报道。

本实验通过对枸杞岛贻贝养殖筏架附着大型海藻的周年采样分析, 探讨贻贝养殖区这一典型人工生境下附着大型海藻各季节的物种组成、分布、多样性和生态位等群落水平上的特征, 并与邻近海域的天然藻场进行比较分析, 以期从东海区海洋牧场构建中初级生产力调控技术的优化角度, 分析自然附着规律的借鉴模式, 为近岸海域人工藻场建设和海洋生态环境修复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样时间和站点

分别于2018年春季(5月)、夏季(8月)、秋季(11月)和冬季(翌年2月)在枸杞岛后头湾贻贝养殖区(30°42'57.17"~30°44'24.71"N, 122°43'56.70"~122°46'10.70"E)进行采样。研究区域共设置12个采样站点, 以岸线为基准, 向外辐射的方向共设置4个采样断面, 每个断面由近岸至离岸均匀设置3个采样点(图1)。

### 1.2 采样与鉴定方法

枸杞岛贻贝养殖筏架由大量的主绳、锚绳、

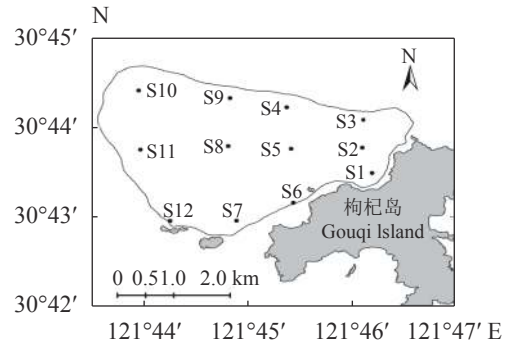


图1 枸杞岛贻贝筏式养殖区采样站点示意图

Fig. 1 Sampling sites of mussel rafts culture area in Gouqi Island

浮球及附有贻贝的苗绳构成(图2)。大型海藻在该养殖设施范围内均有附着, 由于浮球和附有贻贝的苗绳会被渔民不定期的清理, 为使采样更接近自然状况, 减少人工清理带来的误差, 本实验所有样品均采集于筏架打桩固定锚绳(直径3 cm)处。每个采样点随机选取一段长30 cm的锚绳取样, 对覆盖范围内的所有附着大型海藻进行采样、装袋并编号, 所有样品均放入保温箱低温下保存, 当天带回实验室后用清水洗净藻体表面砂砾和藻栖生物, 用吸水纸去掉表面水分后称重(精度为0.001 g), 并进行种类鉴定。生物学实验、数据采集和处理均按照《海洋调查规范》(GB/T 12763.6—2007)第六部分<sup>[15]</sup>; 海洋生物调查进行, 物种鉴定参照《中国海藻志》<sup>[16]</sup>、《浙江大型海藻彩色图集》<sup>[17]</sup>和《浙江洞头大型海藻》<sup>[18]</sup>。

### 1.3 温度和光照测量方法

通过在贻贝养殖筏架区(水下1 m处)放置光量子仪(Onset HOBO UA-002-64, 美国)对光照强度和海表温度进行季节性的连续监测。

### 1.4 数据处理

(1) 本实验中海藻群落物种多样性由以下3个指数分析。

Shannon-Wiener 指数 ( $H'$ )<sup>[19]</sup>:

$$H' = - \sum P_i \text{Log}_2(P_i)$$

物种丰富度指数 Margalef' index ( $D$ )<sup>[20]</sup>:

$$D = (S - 1) / \text{Ln } W$$

物种均匀度指数 Pielou' index ( $J'$ )<sup>[21]</sup>:

$$J' = H' / \text{Log}_2 S$$

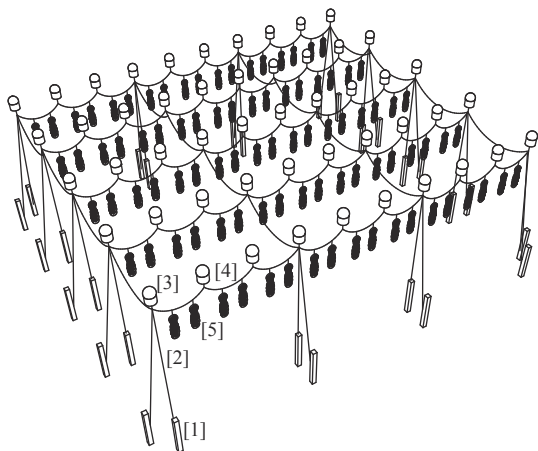


图2 枸杞岛贻贝养殖筏架结构

1. 锚桩, 2. 锚绳, 3. 浮球, 4. 主绳, 5. 贻贝苗绳

Fig. 2 Structure of mussel culture rafts in Gouqi Island

1. anchor block, 2. mooring lines, 3. bouys, 4. long lines, 5. mussels string

式中,  $S$  为群落海藻的总种数,  $P_i$  为第  $i$  种海藻的生物量占样品总生物量的比例,  $W$  为所有海藻种类的总生物量。

(2) 优势种采用 Pianka<sup>[22]</sup> 相对重要性指数 ( $IRI$ ), 计算公式:

$$IRI = (W_i/W) \times F$$

式中,  $W_i$  为第  $i$  种海藻的生物量,  $W$  为所有海藻种类的总生物量,  $F$  为某一种类  $i$  的出现站位数占采样总站位数的百分比, 通常优势种即为优势指数大于 0.02 的生物种类<sup>[23]</sup>。

(3) 季节性的变化运用种类更替率 ( $R$ ) 分析<sup>[24]</sup>, 计算公式:

$$R = (a + b - 2c)/(a + b - c) \times 100\%$$

式中,  $a$ 、 $b$  分别为两个相邻季节的物种数;  $c$  为两个相邻季节共有的物种数。

(4) 生态位宽度采用 Shannon-Wiener 生态位宽度 ( $B_s$ )<sup>[19]</sup> 进行计算:

$$B_s = - \sum_{i=1}^r (P_{ij} \ln P_{ij})$$

式中,  $P_{ij} = N_{ij}/N_{i+j}$ ,  $N_{ij}$  为物种  $i$  在第  $j$  个资源状态的重要值,  $N_{i+j}$  为物种在所有资源状态中的重要值之和,  $r$  为样方数。

(5) 生态位重叠指数采用 Pianka<sup>[22]</sup> 的重叠指数 ( $O_{ij}$ ,  $O_{ji}$ ) 进行计算:

$$O_{ij} = \sum_{k=1}^r (P_{ik}P_{jk}) / \sqrt{\sum_{k=1}^r P_{ik}^2 \sum_{k=1}^r P_{jk}^2}$$

式中,  $P_{ik}$  为物种  $i$  在资源位  $k$  上的重要值占其全

部资源位上重要值的比例,  $P_{jk}$  为物种  $j$  在资源位  $k$  上的重要值占其全部资源位上重要值的比例。

采样站点图以及附着大型海藻平面分布图由 ArcMap 10.6 软件绘制, 生物多样性使用多元统计软件 PRIMER V5.2 完成, 数据统计和相关性分析采用 Excel 2010 软件完成, 显著水平为  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 温度和光照监测

枸杞岛贻贝养殖区 5 月海表水温 16.34~19.77°C, 光照强度 536.16~4519.67 Lx, 8 月海表水温 24.74~27.26°C, 光照强度 303.27~7988.84 Lx, 11 月海表水温 18.58~21.51°C, 光照强度 341.54~2529.53 Lx, 2 月海表水温 9.96~11.90°C, 光照强度 321.54~>1506.09 Lx。海表平均水温 8 月>11 月>5 月>2 月(翌年), 平均光照强度 8 月>5 月>11 月>2 月(翌年)(图 3)。

### 2.2 藻种组成

4 个航次的样品中共鉴定出大型海藻 49 种(表 1), 隶属 11 目 20 科 33 属, 其中红藻门 35 种, 占 71.43%; 绿藻门 11 种, 占 22.45%, 褐藻门 3 种, 占 6.12%。附着大型海藻物种数全年变化较大, 秋季(29 种)>夏季(22 种)>冬季(21 种)>春季(20 种), 出现两季及以上的附着海藻物种数占总数的 34.69%, 四个季节均出现的附着海藻共 6 种, 包括厚网藻、宽角叉珊藻、丛枝软骨藻、密毛沙菜、殖丝藻和孔石莼, 占总数的 12.25%。

### 2.3 附着大型海藻物种数的水平分布及季节变化

枸杞岛贻贝养殖筏架附着大型海藻的物种

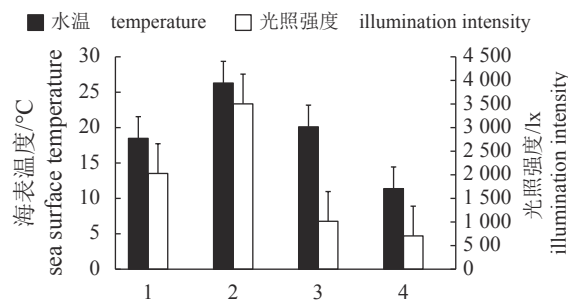


图3 贻贝筏式养殖区海表温度和光照强度季节变化

1. 春季, 2. 夏季, 3. 秋季, 4. 冬季

Fig. 3 Seasonal changes of sea surface temperature and illumination intensity in mussel rafts culture area

1. spring, 2. summer, 3. autumn, 4. winter

数存在明显的季节变化。秋季附着大型海藻物 达 16 种, 其次是 S12 站点, 为 15 种, 其余站点  
种数最多, 为 29 种, 其中 S1 站点物种数最多, 物种数较平均, 附着大型海藻平均物种数呈现

表 1 贻贝养殖筏架上附着大型海藻的种类组成

Tab. 1 Species composition of the epiphytic macroalgae on the mussel rafts

门 Phylum	种类 species	相对重要性指数/% index of relative importance			
		春 spring	夏 summer	秋 autumn	冬 winter
褐藻门 Phaeophyta	长囊水云 <i>Ectocarpus siliculosus</i>			0.11	12.95
	厚网藻 <i>Pachydictyon coriaceum</i>	9.41	0.97	3.56	18.96
	铜藻 <i>Sargassum horneri</i>		0.07	2.8	0.62
红藻门 Rhodophyta	瘤枝凹顶藻 <i>Laurencia glandulifera</i>	2.4	0.22		
	异枝栅凹顶藻 <i>Palisada intermedia</i>			0.36	0
	宽角叉珊藻 <i>Jania adhaerens</i>	11.64	5.77	5.44	7.87
	粗珊藻 <i>Calliarthron yessoense</i>		0.05	0.14	0.38
	盾果藻 <i>Carpopeltis affinis</i>			0.02	
	多管藻 <i>Polysiphonia senticulosa</i>		0		
	链形形藻 <i>Grateloupia catenata</i>			0	
	剑叶海柏 <i>Polyopes lancifolius</i>				0.34
	海萝 <i>Gloiopeltis furcata</i>	0			
	红叶藻 <i>Cirrularia gmelini</i>	0.02			
	扁江蓠 <i>Gracilaria textorii</i>		0.15	5.19	32.24
	脆江蓠 <i>Gracilaria chouae</i>			0	
	真江蓠 <i>Agarophyton vermiculophyllum</i>		0	0.13	
	日本角叉菜 <i>Chondrus nipponicus</i>	0.62		0.01	
	节荚藻 <i>Lomentaria hakodatensis</i>				0
	茎刺藻 <i>Caulacanthus usutulatus</i>	0			
	台湾锯齿藻 <i>Yongagunia formosana</i>		0		0.01
	附着美叶藻 <i>Callophyllis adhaerens</i>	0.01		1.34	0.18
	贴生美叶藻 <i>Callophyllis adnata</i>	0.45	0.13		
	丛枝软骨藻 <i>Chondria dasyphylla</i>	0.01	0	1.21	0.3
	粗枝软骨藻 <i>Chondria crassiaulis</i>			0.03	
	细枝软骨藻 <i>Chondria tenuissima</i>		0.01		0
	密毛沙菜 <i>Hypnea boergesenii</i>	2.52	18.06	31.28	11.46
	珊瑚藻 <i>Corallina officinalis</i>	0.01			
	殖丝藻 <i>Ganonema farinose</i>	0.44	0.27	0.01	0.03
	蛙掌藻 <i>Binghamiella californica</i>	0.26		0.01	
	带形蜈蚣藻 <i>Grateloupia turuturu</i>			2	
鲂生蜈蚣藻 <i>Grateloupia doryphora</i>			0.01		

· 续表 1 ·

门 Phylum	种类 species	相对重要性指数/% index of relative importance			
		春 spring	夏 summer	秋 autumn	冬 winter
	复瓦蜈蚣藻 <i>Grateloupia imbricata</i>			0	
	岗村蜈蚣藻 <i>Grateloupia okamura</i>			1.57	
	舌状蜈蚣藻 <i>Grateloupia livida</i>	6.41	2.44	0.02	
	缢基蜈蚣藻 <i>Grateloupia constrictata</i>	1.3			
	日本仙菜 <i>Ceramium japonicum</i>		0	0	
	日本新管藻 <i>Neosiphonia japonica</i>		0		
	苔状鸭毛藻 <i>Symphyclocladia marchantioides</i>				0
绿藻门 Chlorophyta	螺旋硬毛藻 <i>Chaetomorpha spiralis</i>				4.76
	气生硬毛藻 <i>Chaetomorpha aerea</i>	0.73	31.78	11.47	
	中间硬毛藻 <i>Chaetomorpha antennina</i>				0
	苍白刚毛藻 <i>Cladophora albida</i>	0.02			
	膨胀刚毛藻 <i>Cladophora vagabunda</i>		0.33		0.01
	曲褶刚毛藻 <i>Cladophora flexuosa</i>			0.03	
	斯氏刚毛藻 <i>Cladophora stimpsonii</i>		0.46	3.07	
	浒苔 <i>Ulva prolifera</i>				0.16
	孔石莼 <i>Ulva pertusa</i>	24.5	13.73	0.89	0.86
	刺松藻 <i>Codium fragile</i>	0.02	0.66		
	羽状羽藻 <i>Bryopsis pennata</i>			0.02	

从养殖区内侧至养殖区外侧逐渐减少的趋势；夏季附着大型海藻物种数为 22 种，其中物种数最多的为 S2 和 S8 站点，为 12 种，其次是 S5 和 S11 站点，物种数均为 11 种，均分布在养殖区中部，养殖区内侧和外侧物种数分布较均匀；冬季物种数为 21 种，除 S4 和 S8 物种数为 12 种外，其余站点分布较均匀；物种数最少的为春季，有 20 种，仅 S1 站点物种数大于 10，其余站点平均物种数仅为 6 种，总体上，养殖区内侧附着大型海藻平均物种数高于养殖区外侧和养殖区中部 (图 4)。

#### 2.4 附着大型海藻生物量的水平分布及季节变化

枸杞岛贻贝养殖筏架附着大型海藻平均生物量的季节性变化存在显著差异 ( $P < 0.001$ )。夏季平均生物量最高，达 5529.40 g/m<sup>2</sup>，S12 站点生物量达年度最高值，为 11606.18 g/m<sup>2</sup>，S8 站

点生物量最低，为 1652.68 g/m<sup>2</sup>，由养殖区内侧至养殖区外侧附着大型海藻平均生物量逐渐降低；其次为春季，平均生物量为 3508.58 g/m<sup>2</sup>，S9 站点生物量最高，为 5998.57 g/m<sup>2</sup>，S10 站点次之，S7 站点生物量最低，为 914.25 g/m<sup>2</sup>，其他站点生物量分布相对均匀，养殖区外侧附着大型海藻生物量显著高于养殖区内侧和中部；秋季和冬季平均生物量仅为夏季的 0.5 倍，分别为 2340.45 和 2441.81 g/m<sup>2</sup>，秋季 S10 站点生物量最高，为 6057.50 g/m<sup>2</sup>，S7 站点生物量最低，为 838.18 g/m<sup>2</sup>，各站点间附着大型海藻生物量较均匀；冬季 S2 站点生物量最高，为 5593.61 g/m<sup>2</sup>，S3 站点生物量最低，为 75.18 g/m<sup>2</sup>，由养殖区内侧至养殖区外侧附着大型海藻平均生物量也呈现逐渐降低的趋势 (图 5)。出现两季及以上的附着海藻生物量占当季总生物量的比例分别为 87.83%、99.91%、88.67% 和 91.77%。

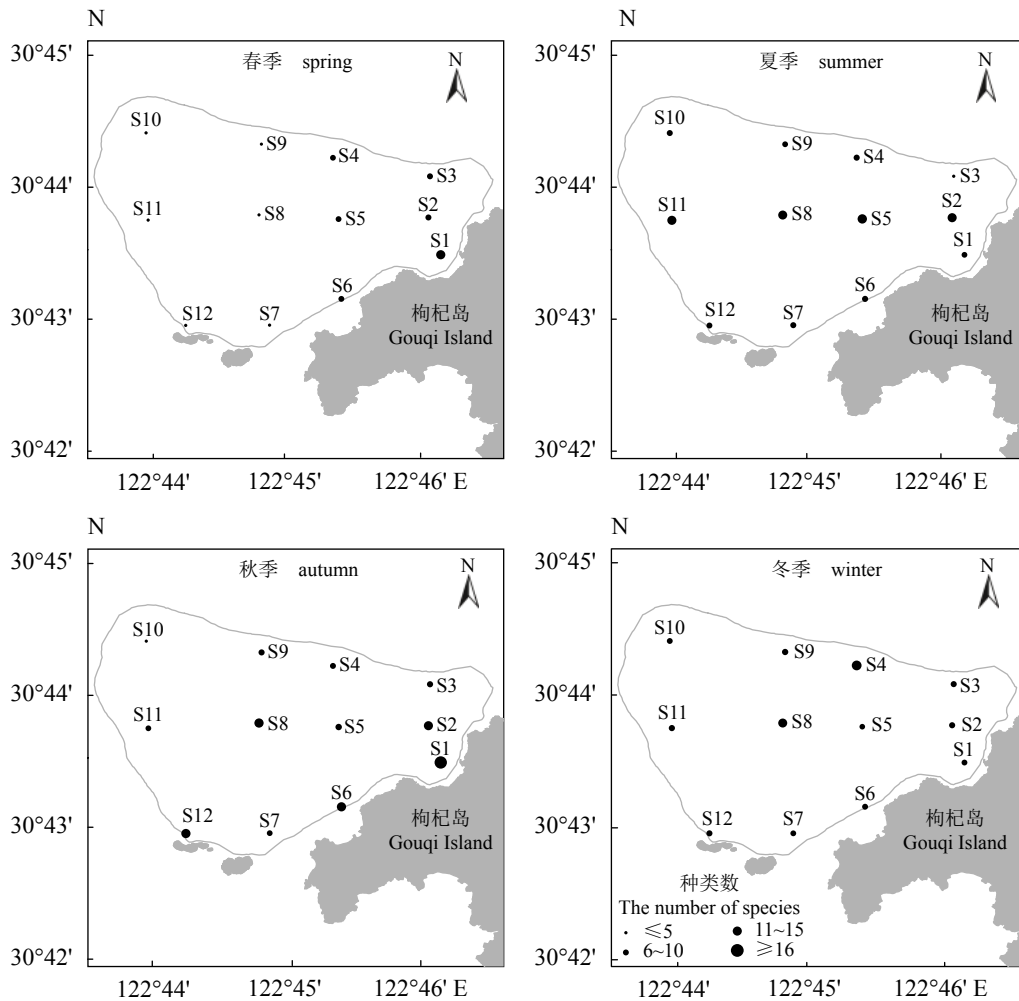


图 4 贻贝养殖筏架附着大型海藻物种数的水平分布和季节变化

Fig. 4 Horizontal distribution and seasonal variation of the number of species of epiphytic macroalgae on the mussel rafts

## 2.5 物种多样性指数

附着大型海藻物种多样性指数分析显示(表 2), 附着大型海藻丰富度指数 ( $D$ ) 最高的为秋季, 其次为冬季, 春季最低; 均匀度指数 ( $J'$ ) 最高的为春季, 其次为秋季, 夏季最低; 多样性指数 ( $H'$ ) 最高的为秋季, 其次为春季, 夏季最低。

## 2.6 优势种及生态位宽度

根据相对重要性指数 ( $IRI$ ) 分析(表 1), 枸杞岛贻贝养殖筏架附着大型海藻优势种共有 13 种, 其中秋季物种数最多, 为 8 种, 春季和冬季都为 6 种, 夏季最少, 为 5 种。全年均出现的优势藻种有宽角叉珊藻和密毛沙菜, 春季优势藻种为孔石莼、宽角叉珊藻和厚网藻等, 夏季优势藻种为气生硬毛藻、密毛沙菜和孔石莼等, 秋

季优势藻种为气生硬毛藻、密毛沙菜和宽角叉珊藻等, 冬季优势藻种为扁江蓠、厚网藻和长囊水云等。优势种存在明显季节更替现象, 春-夏季、夏-秋季、秋-冬季和冬-春季之间优势种的更替率分别为 42.86%、70.00%、60.00% 和 66.67%。

全年优势附着大型海藻生态位宽度值差异较大(表 3), 春季生态位宽度变化范围为 1.01~1.93, 其中孔石莼、厚网藻、宽角叉珊藻生态位宽度较大, 分别为 1.93、1.91 和 1.74; 夏季生态位宽度变化范围为 0.94~2.18, 除舌状蜈蚣藻所占据生态空间的范围较窄外, 其余优势海藻生态位宽度均较大, 且分布较均匀; 秋季生态位宽度变化范围为 0.74~2.21, 密毛沙菜的生态位宽度值达四个季节最大值, 为 2.214; 冬季生态位宽度变化范围为 1.34~2.20, 各优势种生态位

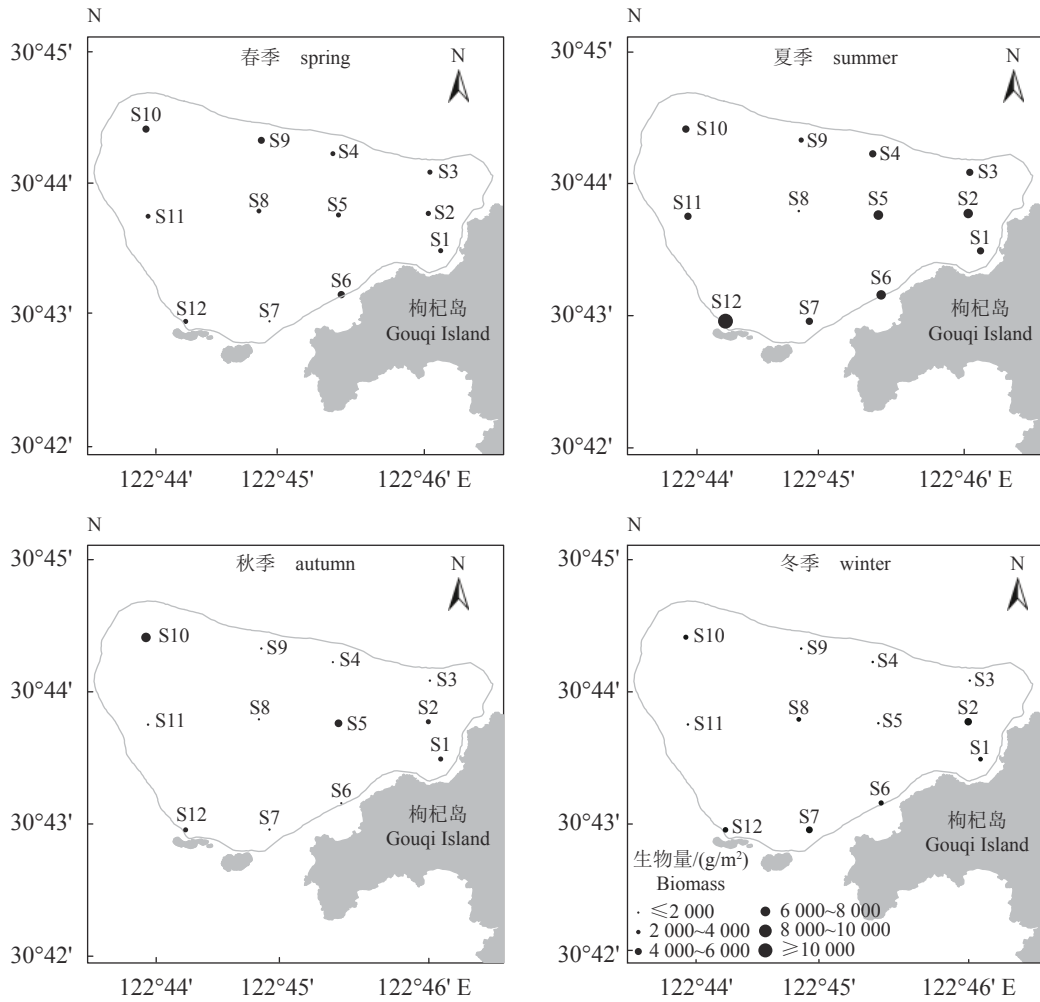


图 5 贻贝养殖筏架附着大型海藻生物量的水平分布和季节变化

Fig. 5 Horizontal distribution and seasonal variation of biomass of epiphytic macroalgae on the mussel rafts

表 2 贻贝养殖筏架附着大型海藻多样性指数的季节变化

Tab. 2 Seasonal variation of the diversity index of epiphytic macroalgae on the mussel rafts

季节 season	丰富度指数 (D) abundance index	均匀度指数 (J') evenness index	多样性指数 (H') diversity index
春季 spring	2.70	0.70	2.10
夏季 summer	2.79	0.61	1.87
秋季 autumn	4.20	0.68	2.30
冬季 winter	2.98	0.66	2.00

宽度值均较大, 扁江蓼生态位宽度相对秋季较大, 厚网藻在出现三个季节中达最大值, 为 2.09。Pearson 相关性分析表明, 表明全年附着大型海藻的相对重要性指数和生态位宽度值间存在极显著正相关关系 (表 4)。

### 2.7 优势种的生态位重叠

春季生态位重叠值范围为 0.023~0.586, 重叠值较大的种对分别为厚网藻与密毛沙菜 (0.59)、宽角叉珊藻与厚网藻 (0.57), 密毛沙菜与舌状蜈蚣藻的生态位重叠值最小 (0.02); 夏季生态位重叠值范围为 0.01~0.70, 重叠值较大的两对分别为宽角叉珊藻与孔石莼 (0.70)、宽角叉珊藻与气生硬毛藻 (0.59), 气生硬毛藻和舌状蜈蚣藻的生态位重叠值最小 (0.01); 秋季生态位重叠值范围为 0~0.86, 重叠值较大的两对分别为扁江蓼与铜藻 (0.86)、宽角叉珊藻与斯氏刚毛藻 (0.54), 带形蜈蚣藻与铜藻的生态位完全不重叠 (0); 冬季生态位重叠值范围为 0.14~0.55, 重叠值较大的两对分别为扁江蓼与厚网藻 (0.55)、宽角叉珊藻与密毛沙菜 (0.48), 螺旋硬毛藻与长囊水云的生态位重叠值最小 (0.14) (表 5)。

表 3 贻贝养殖筏架附着大型海藻优势种的生态位宽度值

**Tab. 3 The niche breadth value of dominant species of epiphytic macroalgae on the mussel rafts**

编号 code	种名 species	生态位宽度 Niche breadth			
		春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
G1	扁江蓐 <i>Gracilaria textorii</i>	-	-	0.93	2.20
J1	宽角叉珊藻 <i>Jania adhaerens</i>	1.74	2.18	1.59	1.77
P1	厚网藻 <i>Pachydictyon coriaceum</i>	1.91	-	1.71	2.09
G2	带形蜈蚣藻 <i>Grateloupia turuturu</i>	-	-	1.32	-
L1	瘤枝凹顶藻 <i>Laurencia glandulifera</i>	1.01	-	-	-
C1	螺旋硬毛藻 <i>Chaetomorpha spiralis</i>	-	-	-	1.34
H1	密毛沙菜 <i>Hypnea boergesenii</i>	1.36	1.80	2.21	2.02
C2	气生硬毛藻 <i>Chaetomorpha aerea</i>	-	2.10	1.38	-
G3	舌状蜈蚣藻 <i>Grateloupia livida</i>	1.21	0.94	-	-
U1	孔石莼 <i>Ulva pertusa</i>	1.93	1.86	-	-
C3	斯氏刚毛藻 <i>Cladophora stimpsonii</i>	-	-	1.56	-
S1	铜藻 <i>Sargassum horneri</i>	-	-	0.74	-
E1	长囊水云 <i>Ectocarpus siliculosus</i>	-	-	-	1.59

注: - 表示未检测

Notes: - means not detection

表 4 优势附着海藻的重要值与生态位宽度值的相关性检验

Tab. 4 Correlation test between important value and niche breadth value of dominant epiphytic macroalgae

季节 season	Pearson 相关系数 Pearson correlation index	显著性 significance
春 spring	0.82	0.001
夏 summer	0.81	0.001
秋 autumn	0.62	0.023
冬 winter	0.86	0

### 3 讨论

#### 3.1 附着海藻的种类组成和多样性

物种组成上, 枸杞岛贻贝养殖区附着大型海藻暖温性种类占总物种数的 75.51%。研究区域属亚热带季风气候, 主要受台湾暖流和长江冲淡水影响。采样调查期间贻贝养殖区内表层水温年变化范围为 9.96~27.26 °C, 这一温度范围适合大多数暖水性种类以及亚热带暖水性种类的生长<sup>[25]</sup>, 附着海藻与该海区底栖海藻温度属性基本相似, 均以暖温性种类为主。

筏架养殖区附着海藻物种数相对于邻近岛礁少<sup>[26]</sup>, 其多样性组成与岩礁区存在显著差异。两种生境下虽均以红藻门种类为主, 但共有种仅 16 种, 扁江蓐、殖丝藻等红藻只出现在养殖筏架, 但褐藻较少。Levring 等<sup>[27]</sup>认为红藻主要栖息在潮下带深水中, 但其在浅海贻贝养殖筏架上也占优势地位, 尤其是宽角叉珊藻、丛枝软骨藻、密毛沙菜和殖丝藻四种海藻在四季均有出现, 体现了红藻对栖息地改变和生长环境的适应性。本实验中在筏架上仅采集到 3 种褐藻, 附着海藻的  $(R+C)/P$  值远高于养殖区周边海域的枸杞岛、东极岛和绿华岛底栖海藻<sup>[28-30]</sup>, 可能与裙带菜和海带等褐藻的个体较大, 对附着基的粗糙度和材质要求较高有关<sup>[31]</sup>, 其主要附着在浮球上, 虽然在贻贝养殖筏架的苗绳上也有一定量的附着, 但是由于不定期的清理和商业采集, 其附着量很难评估。

物种多样性方面, 除了夏季较低外, 其他季节差异不大。秋季附着海藻的物种丰富度和多样性最大, 冬春季次之, 夏季的附着海藻虽然生物量最高, 但多样性 ( $H'$ ) 和均匀度 ( $J'$ ) 却最低。由于高温后大部分海藻衰落, 加上受 7—8



表 5 优势附着海藻的生态位重叠值

Tab. 5 Niche overlaps of dominant epiphytic macroalgae

编号 code	春季 spring						编号 code	夏季 summer							
	J1	P1	L1	H1	G3	U1		J1	H1	C2	G3	U1			
J1							J1								
P1	0.57						H1	0.36							
L1	0.23	0.16					C2	0.59	0.49						
H1	0.42	0.59	0.33				G3	0.19	0.03	0.01					
G3	0.04	0.32	0.05	0.02			U1	0.70	0.16	0.44	0.34				
U1	0.11	0.17	0.21	0.26	0.35										
编号 code	秋季 autumn								编号 code	冬季 winter					
	G1	J1	P1	G2	H1	C2	C3	S1		G1	J1	P1	C1	H1	E1
G1									G1						
J1	0.07								J1	0.25					
P1	0.04	0.45							P1	0.55	0.30				
G2	0.03	0.12	0.38						C1	0.39	0.15	0.26			
H1	0.16	0.30	0.47	0.40					H1	0.42	0.48	0.30	0.20		
C2	0.04	0.19	0.18	0.05	0.29				E1	0.20	0.32	0.50	0.14	0.25	
C3	0.14	0.54	0.20	0.34	0.26	0.08									
S1	0.86	0.19	0.17	0.00	0.11	0.02	0.08								

注：种类编码见表3

Note: species codes are listed in Tab. 3

月当地贻贝采收活动的影响，只有少数适宜全年生长的藻类存在，致使种类均匀度的下降和多样性的减小。与潮间带大型海藻群落多样性季度间差异相比<sup>[32]</sup>，贻贝养殖海区附着海藻在各季度的多样性值均较高，可见养殖生境呈现的水体上层空间异质性扩展了不同生态型海藻的生态位。

### 3.2 附着海藻的季节变化和水平分布特征

贻贝养殖筏架附着海藻多样性的季节变化规律(秋季>夏季>冬季>春季)，与潮间带底栖海藻的季节变化规律(春季>冬季>秋季>夏季)存在较大差异<sup>[32-33]</sup>，形成这种变化规律的原因可以从海域的水动力效应和生物学机制予以解析。海流作用对底栖海藻的生长是不可忽视的因素之一，尤其夏季的大风大浪条件极大地影响了底栖海藻孢子的附着，对于一些处于成藻时期但藻体脆弱易断的种类，台风和风暴潮活动也是移除海藻植株的主要原因<sup>[34]</sup>。贻贝养殖设施对水流交换有显著的阻滞作用，使养殖区内表层潮

流速度较场外可降低 75%~90%<sup>[35-36]</sup>，这为大型海藻孢子的附着和植株生长提供了良好的环境<sup>[4]</sup>。本研究发现附着海藻生物量的季节变化规律为夏季>春季>冬季>秋季，且夏季平均生物量远高于其他季节。一方面，夏季自然生境中的底栖海藻在高温、潮汐和干出作用等影响下大量衰败<sup>[37]</sup>，导致生物量急剧下降，而养殖筏架上的附着海藻主要生活在水下 0.5~1.0 m，无干出和较低速度的潮流在一定程度上避免了物理环境对藻体的破坏；另一方面，贻贝的新陈代谢作用可使养殖区内铵盐浓度达到非养殖区的 10 倍以上<sup>[12, 38]</sup>，为大型海藻的生长提供了充足的营养盐<sup>[39]</sup>，同时养殖区的水体透明度平均高于岛礁周边水域，导致附着海藻的光合作用较强，有利于大型海藻的生长。夏末大型褐藻开始死亡腐烂，附着海藻生物量整体下降，秋季水温下降后，一些冷水性海藻虽然开始生长，生物量在四个季节中却是最低。

总体上，附着海藻物种数和生物量的水平分布均呈现从养殖区内侧至外侧逐渐减少的特

点。贻贝养殖区内侧作为岩礁生境和人工生境的过渡带, 具有较高的物种多样性。养殖区距离近岸岩礁区最近处不过百米, 潮间带底栖海藻幼孢子体在暴波高强度的作用下容易被波浪和水流冲离并随水流扩散<sup>[40]</sup>, 附着于较近的筏架基质上。充足的氮、磷营养盐供应是维持大型海藻高生物量的关键<sup>[41]</sup>, 春季以孔石莼为代表的绿藻由于对氮源有较高的需求<sup>[42]</sup>, 主要分布在养殖区外侧, 而红藻主要分布在养殖区内侧和中间, 夏季附着海藻生物量变化也呈现从养殖区内侧至外侧逐渐减少的特点, 考虑其变化趋势与生物量主导藻种-气生硬毛藻对营养盐的响应有关<sup>[43]</sup>, 秋冬两季分布较均匀。

综上, 贻贝筏式养殖区局部流态的改变和营养盐供给机制的差异可能是影响附着海藻物种数和生物量水平分布的主要因素。另一方面, 由于贻贝养殖活动的影响, 一些大型海藻的生长周期和生活史特征发生改变。生长期的延长是大型海藻对筏架养殖生境的适应性选择, 可以一定程度上延长表层空间初级生产力水平, 并提高对海域有机碎屑的供给量。这些规律可以针对性地应用在今后人工海洋牧场的设计中。

### 3.3 附着海藻优势种及生态位特征

绿藻门的孔石莼、褐藻门的厚网藻以及红藻门的宽角叉珊藻和密毛沙菜是养殖区多数季节的优势种。总体上它们全年均具有较高的生态位宽度值, 表明其在群落中分布较广、生物量大, 且利用资源能力较强, 具有较大的生态适应范围。但在不同季节其生态位宽度值存在一定的差异, 其变化反映了其在群落中的功能和地位的改变, 这与水温、光照以及其藻体自身的生长周期有关<sup>[44]</sup>。本研究中, 厚网藻、孔石莼和扁江蓐等仅在特定季节出现且分布较广泛, 对资源利用能力较强, 具有较高的生态位宽度值, 而螺旋硬毛藻和铜藻等因其对资源的利用能力较低或分布不均匀, 使其生态位宽度较窄, 更倾向于特化种。结合本团队对养殖区周边海域海藻场的调查, 底栖生长的孔石莼、铜藻等优势藻种的生长范围受到一定限制, 仅分布在地势较平缓的近岸区, 平均生态位宽度仅为养殖区的1/4<sup>①</sup>。各季节附着海藻优势种间均存在不同程度的重叠, 但总体上群落结构处于稳定的

状态, 生态位重叠仅是种间竞争的前提, 藻种间可通过时空生态位的分化避免直接竞争, 这在底栖海藻的分布也得以体现, 藻场中近岸侧以铜藻、羊栖菜和裙带菜等大型直立生长的海藻为主, 离岸侧以网地藻和宽角叉珊藻等一些贴地生长的藻种为主<sup>[45]</sup>。一般认为, 物种生态位重叠大小与生态位宽度存在一定的线性关系<sup>[46]</sup>, 但当两个物种在局部生境下分布特征较相似时, 生态位宽度相对压缩, 物种生态位重叠大小与生态位宽度可能存在负相关关系, 如本研究中铜藻和扁江蓐在秋季生态位宽度分别为0.74和0.93, 由于二者均主要分布在养殖区外侧并呈斑块状分布, 生态位重叠指数高达0.86。藻场内底栖海藻间也存在这一现象, 如孔石莼和珊瑚藻由于受光照、潮汐等环境因子的限制, 二者分布范围较窄, 集中生长在近岸藻场区, 生态位重叠指数达0.81<sup>①</sup>。这一现象说明某些藻种和环境存在一定的空间异质性, 适宜的生境斑块、栖息环境的变化以及物种自身的生理状态均会影响物种在群落结构中的地位与功能。

### 3.4 对海洋牧场海藻场构建的启示

海藻场建设已成为中国海洋牧场工程的重要一环, 但许多海域特别是东海区由于近岸海底光照条件较差以及基岩底质的限制导致在适合海藻生长深度的分布面积上非常有限, 因此难以按照传统的模式建设底栖类型的海藻场。基于此, 在开阔海域表层设置大型海藻附着基的方式构建人工藻场, 扩增潮间带大型海藻生长区和延长生长周期, 应该成为中国未来海洋牧场建设至关重要的工作。通过本研究的一系列探索和分析, 可以总结如下:

①贻贝养殖活动为海藻的定植和生长提供了良好的微环境<sup>[47]</sup>。相较于岩礁底栖海藻, 部分常见经济藻种的生命周期得以延长, 甚至成为周年生海藻, 在群落中占有一定优势地位。虽然我国一定规模的养殖海藻所形成的生境扮演着类似天然藻场的角色, 而且在部分海域海藻养殖区已被纳入到海洋牧场的建设当中, 但是仍存在海藻种类单一、投入成本较高等问题, 而贝类筏式养殖所形成的附着海藻有效解决了这一系列问题。

②受筏式养殖过程影响, 适宜海藻的栖息

①来源于现代农业产业技术体系专项2019年枸杞岛海藻场年度调查报告, 内部报告

生境已改变,生长空间扩宽,这为海藻场修复过程中大型海藻孢子或受精卵的播撒以及海藻移植工作提供了参考依据。

③贻贝养殖活动长期存在,大规模的采收活动几年才发生一次,且这些人工筏式养殖区受到养殖户的构建与管理,保证了附着海藻的大规模持续性存在,这一定程度上解决了藻场修复后管理和资金投入问题。

将贻贝养殖等筏式设施适当地整合到海洋牧场建设中,规模性养殖筏架的长期存在,延长了厚网藻、舌状蜈蚣藻、密毛沙菜等海藻的生长周期,增加了铜藻、扁江蓐等海藻的栖息空间,从而改变了整个区域的海藻群落结构,使该生境下大型海藻可提供全年的初级生产力和海藻碎屑以及大量钩虾、麦秆虫等渔业资源的饵料生物,这些规律为当地海洋牧场的高效建设提供了重要的科学依据,为海洋牧场中附着海藻的种类选择提供了直接参考。

#### 参考文献 (References):

- [1] 安鑫龙,李雪梅,徐春霞,等.大型海藻对近海环境的生态作用[J].水产科学,2010,29(2):115-119.  
An X L, Li X M, Xu C X, et al. Ecological effects of seaweeds on the coastal environment[J]. Fisheries Science, 2010, 29(2): 115-119(in Chinese).
- [2] 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 S Y, Liu S R, Zhou X J, 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(in Chinese).
- [3] 王铁杆,胡仁勇,张鹏,等.洞头列岛大型底栖海藻的组成与区系分布[J].上海海洋大学学报,2012,21(6):1025-1031.  
Wang T G, Hu R Y, Zhang P, et al. Floral analysis and species diversity survey of benthic macroalgae in Dongtou-Archipelago[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21(6): 1025-1031(in Chinese).
- [4] Ganesan M, Selvaraj K, Chithra K, et al. Epiphytism differences in *Gelidiella acerosa* cultivated with floating rafts and concrete blocks[J]. Journal of Applied Phycology, 2015, 27(1): 399-412.
- [5] 骆其君.象山港海域中定点漂浮物的大型海藻演变[J].宁波大学学报(理工版),2009,22(4):467-471.  
Luo Q J. Change of macroalgae in fixed floats in Xiangshan Bay[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2009, 22(4): 467-471(in Chinese).
- [6] 刘书荣,周曦杰,章守宇,等.贻贝筏式养殖区附生大型海藻与两种附着端足目的关系[J].生态学杂志,2018,37(9):2737-2744.  
Liu S R, Zhou X J, Zhang S Y, et al. Relationship between epiphytic seaweeds and two seaweed-associated amphipods in mussel raft culture area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(9): 2737-2744(in Chinese).
- [7] 汪振华,钟佳明,章守宇,等.褐菖鲉幼鱼对贻贝养殖生境的利用规律初探[J].水产学报,2019,43(9):1900-1913.  
Wang Z H, Zhong J M, Zhang S Y, et al. Habitat use of juvenile rockfish (*Sebastiscus marmoratus*) in mussel farming waters: a preliminary study[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 1900-1913(in Chinese).
- [8] Miller R J, Page H M. Kelp as a trophic resource for marine suspension feeders: a review of isotope-based evidence[J]. Marine Biology, 2012, 159(7): 1391-1402.
- [9] 周曦杰,章守宇,王旭,等.枸杞岛海藻场角螺夏季摄食选择性及其生态学意义[J].水产学报,2015,39(4):511-519.  
Zhou X J, Zhang S Y, Wang X, et al. The feeding behaviour and ecological function during summer of one herbivore on seaweed bed in Gouqi Island: the gastropod, *Turbo cornutus* Solander[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(4): 511-519(in Chinese).
- [10] 章守宇,汪振华,林军,等.枸杞岛海藻场夏、秋季的渔业资源变化[J].海洋水产研究,2007,28(1):45-52.  
Zhang S Y, Wang Z H, Lin J, et al. Variation of fisheries resources in summer and autumn in seaweed beds of Gouqi Island[J]. Marine Fisheries Research, 2007, 28(1): 45-52(in Chinese).
- [11] 陈明超.枸杞岛海域浮游植物群落结构分析[D].上海:上海海洋大学,2011.  
Chen M C. The community structure of phytoplankton in Gouqi Island[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011 (in Chinese).
- [12] 王旭,赵旭,章守宇,等.枸杞岛贻贝养殖水域碳氮磷分布格局[J].水产学报,2015,39(11):1650-1664.  
Wang X, Zhao X, Zhang S Y, et al. Distribution pattern of dissolved carbon, nitrogen and phosphorus in mussel culture areas of Gouqi Island[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(11): 1650-1664(in Chinese).

- [13] 邓明星. 贻贝筏式养殖对海域水动力及浮游植物生态系统影响 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.  
Deng M X. Effects of raft aquaculture on dynamics and phytoplankton ecosystem[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [14] 刘媛媛. 枸杞岛贻贝养殖区生态效应及修复策略研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.  
Liu Y Y. Study on the ecological effect and ecological restoration strategies of *Mytilus edulis* filter-feeding in Gouqi Island[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [15] 国家海洋局. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
State Oceanic Administration. GB/T 12763.6-2007 Specifications for oceanographic survey-Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: China Standard Press, 2008 (in Chinese).
- [16] 夏邦美. 中国海藻志 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
Xia B M. Flora algarum marinarum Sinicarum[M]. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese).
- [17] 毛欣欣, 蒋霞敏, 林清菁. 浙江大型海藻彩色图集 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
Mao X X, Jiang X M, Lin Q J. Color atlas of macroalgae in Zhejiang Province[M]. Beijing: Science Press, 2011 (in Chinese).
- [18] 王铁杆, 胡仁勇, 孙庆海, 等. 浙江洞头大型海藻 [M]. 北京: 海洋出版社, 2012.  
Wang T G, Hu R Y, Sun Q H, *et al.* Macroalgae in Dongtou of Zhejiang Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012 (in Chinese).
- [19] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [20] Magurran A E. Ecological diversity and its measurement[M]. Princeton: Princeton University Press, 1988.
- [21] Pielou E C. Ecological diversity[M]. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [22] Pianka E R. The structure of lizard communities[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 53-74.
- [23] Clarke K R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure[J]. *Australian Journal of Ecology*, 1993, 18(1): 117-143.
- [24] 刘瑞玉. 胶州湾生态学和生物资源 [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 2-3.  
Liu R Y. Ecology and living resources of Jiaozhou Bay[M]. Beijing: Science Press, 1992: 2-3 (in Chinese).
- [25] 曾呈奎, 张峻甫. 中国沿海海藻区系的初步分析研究[J]. *海洋与湖沼*, 1963, 5(3): 245-253.  
Tseng C K, Chang C F. A preliminary analytical study of the Chinese marine algal flora[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963, 5(3): 245-253(in Chinese).
- [26] 林清菁, 蒋霞敏, 徐镇, 等. 嵊泗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 Q J, Jiang X M, Xu Z, *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(in Chinese).
- [27] Levring T. Photosynthesis of some marine algae in clear, tropical oceanic water[J]. *Botanica Marina*, 1968, 11(1-4): 72-80.
- [28] 章守宇, 梁君, 汪振华, 等. 浙江马鞍列岛海域潮间带底栖海藻分布特征[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2299-2307.  
Zhang S Y, Liang J, Wang Z H, *et al.* Distribution characteristics of benthic algae in intertidal zone of Ma'an Archipelago of Zhejiang Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2299-2307(in Chinese).
- [29] 周宏, 杨万喜. 嵊泗列岛岩相潮间带底栖海藻种类组成及区系特点[J]. *海洋湖沼通报*, 2001(2): 35-40.  
Zhou H, Yang W X. Species constitution and flora characteristics of benthic algae in the rocky intertidal zone of Shengsi Archipelago[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2001(2): 35-40(in Chinese).
- [30] 郑海斌, 蒋霞敏, 傅财华, 等. 浙江东极潮间带底栖海藻分布特征[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2011, 24(4): 29-35.  
Zheng H B, Jiang X M, Fu C H, *et al.* Distribution characteristics of benthic algae in intertidal zone of Dongji of Zhejiang Province[J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2011, 24(4): 29-35(in Chinese).
- [31] 施超. 11 种威海常见海藻附着密度与附着基关系的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015.  
Shi C. Research on the relationship between density and substrate of 11 kinds of common seaweed in Weihai[D]. Ji'nan: Shandong University, 2015 (in Chinese).
- [32] 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 Y P, Ma J H, Chen B B, *et al.* Survey on the com-

- munity of benthic macro-algae in Gouqi Island of Zhejiang Province[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2013, 25(5): 1096-1102(in Chinese).
- [33] 周汝金. 大连金石滩潮间带底栖海藻生态学研究 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2016.  
Zhou R J. Intertidal benthic algae ecology research in Jinshitan of Dalian[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2016 (in Chinese).
- [34] 吴祖立, 章守宇. 台风对浙江枸杞岛大型底栖海藻分布的影响分析[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(9): 159-168.  
Wu Z L, Zhang S Y. Effect of Typhoon on the distribution of macroalgae in the seaweed beds of Gouqi Island, Zhejiang Province[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(9): 159-168(in Chinese).
- [35] 匡翠萍, 董智超, 顾杰, 等. 秦皇岛筏式养殖对水动力和污染物运输的影响[J]. *自然科学版*, 2019, 47(7): 967-975.  
Kuang C P, Dong Z C, Gu J, *et al.* Impact of raft-culture on hydrodynamic and pollutant transport in Qinhuangdao coastal water[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(7): 967-975(in Chinese).
- [36] 林军, 章守宇. 贻贝筏式养殖的水动力及生态效应研究: 观测与数值模拟 [C]. 北京: 中国水产学会, 2014: 338.  
Lin J, Zhang S Y. Hydrodynamic and ecological effect of an offshore mussel suspended aquaculture farm: Observation and modelling[C]. Beijing: The China Society of Fisheries, 2014: 338 (in Chinese).
- [37] 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 X, Xie Q L, Li S L, *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(in Chinese).
- [38] 林军, 邓明星, 章守宇, 等. 贻贝养殖海域表层水温季节变化及其对紫贻贝生长的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(6): 918-926.  
Lin J, Deng M X, Zhang S Y, *et al.* Seasonal variation of surface water temperature and its ecological impacts in a mussel aquaculture farm[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(6): 918-926(in Chinese).
- [39] Wear D J, Sullivan M J, Moore A D, *et al.* Effects of water-column enrichment on the production dynamics of three seagrass species and their epiphytic algae[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 179: 201-213.
- [40] Gordon R, Brawley S H. Effects of water motion on propagule release from algae with complex life histories[J]. *Marine Biology*, 2004, 145(1): 21-29.
- [41] 林芳. 大型海藻生理生化特性对营养盐和水流交换的响应——以羊栖菜和石莼为例 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
Lin F. Physiological and biochemical responses of seaweed to nutrient and water exchange[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016 (in Chinese).
- [42] 张永正, 王萍, 桂福坤, 等. 石莼、铁钉菜和蜈蚣藻对氮源利用的研究[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(3): 341-345.  
Zhang Y Z, Wang P, Gui F K, *et al.* Utilization of nitrogen of *Ulva lactuca*, *Ishige foliacea okamurai* and *Grateloupia filicina*[J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(3): 341-345(in Chinese).
- [43] 韩月, 王绍军, 葛厂字. 气生硬毛藻对复合污染的生理响应[J]. *齐鲁渔业*, 2017, 34(8): 23-30.  
Han Y, Wang S J, Ge C Z. Physiological response of *Chaetomorpha aerea* to combined pollution[J]. *Shandong Fisheries*, 2017, 34(8): 23-30(in Chinese).
- [44] 彭欣, 谢起浪, 陈少波, 等. 南麂列岛潮间带底栖生物时空分布及其对人类活动的响应[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(5): 584-589.  
Peng X, Xie Q L, Chen S B, *et al.* Distribution of intertidal benthos and the human impact in Nanji islands, China[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2009, 40(5): 584-589(in Chinese).
- [45] 王蕾. 枸杞岛海藻场生态系统与鱼类群落季节变化的关系 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.  
Wang L. Relationship between kelp beds and fish assemblages variety at Gouqi Island[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011 (in Chinese).
- [46] Walker B. Conserving biological diversity through ecosystem resilience[J]. *Conservation Biology*, 1995, 9(4): 747-752.
- [47] Lawrence J E, Grant J, Quilliam M A, *et al.* Colonization and growth of the toxic dinoflagellate *Prorocentrum lima* and associated fouling macroalgae on mussels in suspended culture[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 201: 147-154.

## Community structure of epiphytic macroalgae on mussel culture rafts in Gouqi Island

ZHANG Shouyu<sup>1</sup>, CUI Xiao<sup>1</sup>, WANG Zhenghua<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1\*</sup>,  
CHENG Xiaopeng<sup>1</sup>, LIU Shurong<sup>2</sup>, SHEN Hui<sup>1</sup>

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200204, China)

**Abstract:** Macroalgae that grow naturally on the artificial rafts of shellfish culture, have attracted much attention due to their high coverage, high biodiversity, and large biomass, as well as the following ecological side effects of the formation of amphipods such as Gammaridea and Caprellidae, and the microbial on the leaves communities. In order to understand the characteristics of the species composition, distribution pattern and seasonal variation of macroalgae in the mussel raft culture area, the epiphytic macroalgae adhere to the mussel rafts around Gouqi Island in spring (May), summer (August), and autumn (November) of 2018, and winter (February) of 2019 were sampled and analyzed. The results showed that 49 species of epiphytic macroalgae belonged to 11 orders, 20 families, and 33 genera. In terms of seasonal variation, the number of species was the highest in autumn (29 species), the lowest in spring (20 species), with an average of 23 species; the seasonal variation of average biomass was the highest in summer (5 529.40 g/m<sup>2</sup>), and the lowest in autumn (2 340.45 g/m<sup>2</sup>). The annual average value was 3 455.06 ± 1 480.40 g/m<sup>2</sup>; the horizontal distribution of species number and biomass were gradually decreasing from the inside to outside of the culture zones; the highest index of epiphytic macroalgae diversity (*H'*) was in autumn (2.30). The lowest was in summer (1.87), the annual average was 2.07 ± 0.18; there were 13 dominant species in the epiphytic macroalgae community, the highest in autumn (8 species) and the lowest in summer (5 species), with an average of 6 species. The dominant species that existed throughout the year were *Jania adhaerens* and *Hypnea boergesenii*; among the dominant epiphytic macroalgae, the maximum and minimum niche breadth occurred in autumn, they were *Hypnea boergesenii* (2.214) and *Sargassum horneri* (0.739); the maximum and minimum values of niche overlap occurred in autumn, and they were *Sargassum horneri-Gracilaria textorii* (0.861) and *Grateloupia tururu-Sargassum horneri* (0) respectively. The present study has shown that the existence of large-scale raft culture can prolong the growth period of red algae such as *Grateloupia livida* and *Hypnea boergesenii*, and broaden the habitat range of brown algae such as *Sargassum horneri*, thus changing the community structure of macroalgae in the culture area, which is conducive to maintaining a higher level of annual primary productivity and the production of macroalgae debris in the sea area, and providing new ideas and important scientific basis for the construction of seaweed beds in the process of marine ranch construction.

**Key words:** seaweed beds; epiphytic macroalgae; seasonal variation; distribution characteristics; diversity; ecological niche

**Corresponding author:** WANG Kai. E-mail: kwang@shou.edu.cn

**Funding projects:** National Key R&D Program of China (2019YFD0901303); National Natural Foundation of China (41876191); China Agriculture Research System (CARS-50)