

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2018.17268

崂山湾人工礁区大型底栖海藻时空格局及对环境变化的响应

杨晓龙¹, 吕洪斌¹, 胡成业¹, 张秀梅^{1,2}

1. 中国海洋大学, 海水养殖教育部重点实验室, 山东 青岛 266003;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266003

摘要: 2015 年 5—9 月对青岛崂山湾两个人工礁区大型底栖海藻的水平和垂直分布特征进行了调查, 初步探明了两个人工礁区大型底栖海藻的群落特征、月际更替规律及其对环境因子的响应。结果表明, 崂山湾两个人工礁区内及礁区间不同水深的水流强度差异极显著, 不同月份温度差异显著; 调查期间共采集到大型底栖海藻 26 种, 隶属于 3 门 17 科 21 属, 其中红藻 15 种, 褐藻 7 种, 绿藻 4 种, 分别占总种类数的 57.69%、26.92%和 15.38%; 不同月份的大型底栖海藻种类更替差异显著, 酸藻(*Desmarestia viridis*)、金膜藻(*Chrysomenia wrightii*)和扁江蓠(*Gracilaria textorii*)分别是春季、夏季和秋季的第一优势种; 大型底栖藻类群落的物种多样性指数呈先升高后降低趋势, 且三亩前礁区多样性指数普遍高于黄山口礁区, 温度变化是造成不同月份物种多样性指数和优势种变化的主要原因。冗余分析(RDA)排序结果显示, 温度是影响大型底栖藻类月际更替的主要因素, 对变量的解释率达到 37.64%; 水流强度和水深是影响大型底栖藻类水平和垂直分布的主要环境因子, 对变量的解释率分别为 26.54%和 19.13%。研究结果表明, 崂山湾人工鱼礁为大型底栖海藻提供了良好的附着基; 礁区建成 5 年后大型底栖海藻群落已经发展至顶级群落, 群落季节更替较稳定, 具有一定抵御外界干扰的能力。

关键词: 崂山湾; 大型底栖海藻; 人工鱼礁; 水流强度; 月际动态

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2018)03-0642-12

大型底栖海藻指依靠假根、附着器或基细胞在海底基质营固着或附着生活的多细胞海洋孢子植物^[1]。大型底栖海藻在全球近海广有分布, 是海洋生态系统中重要的初级生产者^[2], 对海洋生态系统的物质循环、能量流动和信息传递起到关键作用^[3]。海藻场生态系统(seaweed bed system)是以大型底栖海藻为支撑生物, 辅以浮游生物、底栖动物和游泳动物, 并与非生物因子相互作用共同构成的典型近岸生态系统^[4]。海藻场生态系统具有巨大的初级生产力, 约占全球海洋初级生产力的 10%, 而且为海洋生物提供了产卵、索饵、育幼和躲避的场所。因此, 海藻场生物群落结构复杂、生物多样性高^[5]。随着人类对近海的开发进程加剧, 围海造田、过度捕捞和污染物排放等行

为对海藻场生境造成了严重破坏, 海藻分布面积急剧退化^[6], 从而使大型底栖藻类的修复与保护研究日益受到全球关注。

大型底栖藻类的分布格局及群落演替主要受环境因子影响, 其群落结构变化通常作为评价海洋环境质量的重要指标^[7-8]。国外对大型底栖藻类与周围环境相互作用的研究起步较早, 内容主要涉及波浪强度^[9]、底质粗糙程度^[10]、营养盐^[11]、温度和光照^[12]等对大型底栖藻类生理生态和多样性的影响。国内研究聚焦于潮间带大型底栖藻类的群落结构变化, 同时对大型底栖海藻场的修复和保护提出建议及规划^[13-14], 但对潮下带人工鱼礁区大型底栖海藻的群落结构和时空变化鲜有报道^[15]。

收稿日期: 2017-07-15; 修订日期: 2017-08-28.

基金项目: 海洋公益性行业科研专项项目(201405010).

作者简介: 杨晓龙(1988-), 男, 博士研究生, 从事渔业资源与生态研究. E-mail: xiaolong1988_@126.com

通信作者: 张秀梅, 教授. E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn

为恢复近岸海藻场, 重建海洋生物产卵床, 在青岛崂山湾海域开展了投石建礁工作。本研究通过对崂山湾两个人工礁区的大型底栖海藻及主要环境因子的监测, 分析人工礁区水平和垂直方向藻类群落的结构特征、多样性及优势种的月际更替及其对环境因子的响应, 旨在为全面评价人工鱼礁对海藻场的支持功能及海藻场生态修复研究提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 调查区域

调查地点位于青岛市崂山湾黄山头至崂山头之间的近岸海域, 为开展渔业经济物种(鲍、海参等)的增殖与鱼类产卵场和海藻场修复, 于2009—2010年共计投石 32000 m^3 , 投礁面积 0.397 km^2 。礁区位于黄山口、三亩前和列坡三处海区。本研究的监测站位分别位于三亩前(S) ($36^{\circ}08.70'\sim 36^{\circ}09.00'\text{N}$, $120^{\circ}42.00'\sim 120^{\circ}42.30'\text{E}$)和黄山口(H) ($36^{\circ}09.50'\sim 36^{\circ}10.00'\text{N}$, $120^{\circ}41.60'\sim 120^{\circ}41.90'\text{E}$)两个礁区, 两个人工礁区投放礁体类型均以天然石

块为主, 其中三亩前共计投放礁石 6000 m^3 , 黄山口共计投放 12000 m^3 。因所处地理位置不同, H礁区受东南和东北季风影响较大, 水动力作用较S礁区强。本研究分别选取两个礁区的浅水区、中层区和深水区设置采样位点, 如图1所示, 其中浅水区(S1和H1)、中层区(S2和H2)和深水区(S3和H3)的水深范围分别为 $2.89\sim 3.27\text{ m}$ 、 $5.46\sim 5.77\text{ m}$ 和 $7.24\sim 7.81\text{ m}$ 。

1.2 样品的采集与处理

1.2.1 生物样品采集 于2015年5—9月逐月以潜水采样方式在礁石上进行样品采集, 每个礁区随机选取6个 $25\text{ cm}\times 25\text{ cm}$ 的样方, 将样方内的海藻整体用刀片取下存于自封袋中, 记录采样信息后, 0°C 以下保存至保温盒中。待海藻样品运至实验室, 将海藻仔细冲洗, 进行拍照、种类鉴定及统计工作, 统计样方中的海藻种类、密度(ind/m^2)和生物量(g/m^2)。

1.2.2 水体物理参数的测定 采用多参数水质监测仪(YSI-650)分别测定高潮期和低潮期采样点的环境参数, 包括盐度(salinity)、溶氧(dissolved

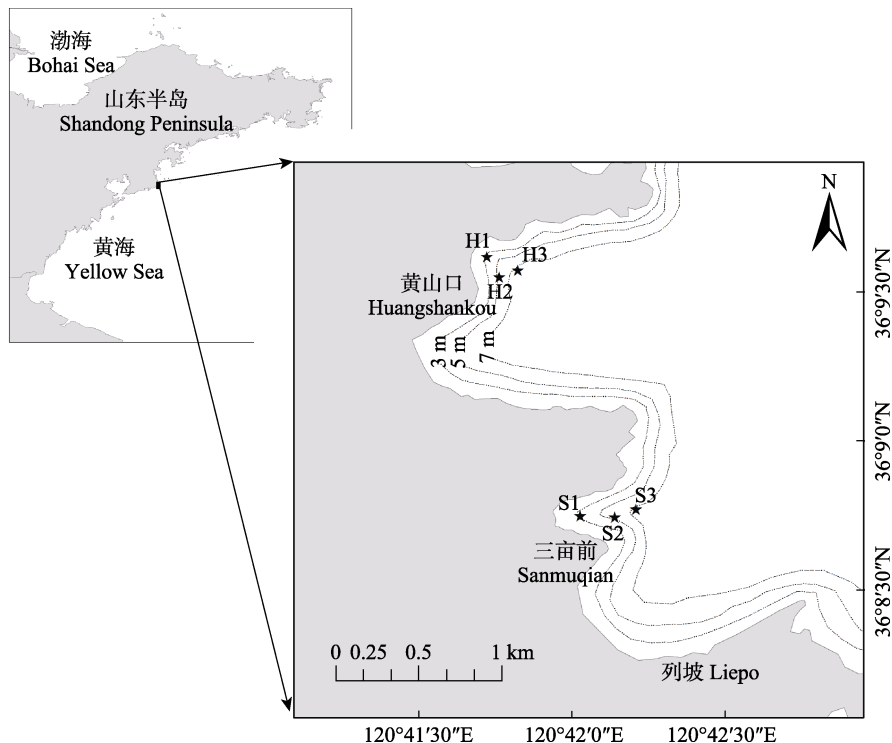


图1 崂山湾大型底栖海藻取样位置图

Fig. 1 Location of sampling stations in Laoshan Bay in the present study

oxygen) 和酸碱度 (pH); 用超声波测深仪 (M377485) 测各站位的水深, 并对照当日潮汐表校正计算实际水深; 采用透明度盘测量水体透明度; 采用便携式光照记录仪 (HOBO Temperature/Light Data Logger) 测定各站位的光照度和温度变化, 设置记录间隔为 2 s。

水流强度 (wave motion, WM) 能客观反映水动力作用对生物体的冲击作用, 本研究采用石膏球法 (图 2) 测定两个礁区不同水深的水流强度, 具体操作过程参见文献 [16]。水流强度的计算公式为

$$WM = (M_1/M_2) \times (T_1/T_2)$$

式中, WM 为该站位水流强度指数, 是一个无量纲参数, WM 值越大, 表明水流冲击作用越强; M_1 为采样现场石膏块的质量损失 (g); M_2 为静水中的质量损失 (g); T_1 为采样现场放置时间 (h); T_2 为静水中放置时间 (h)。

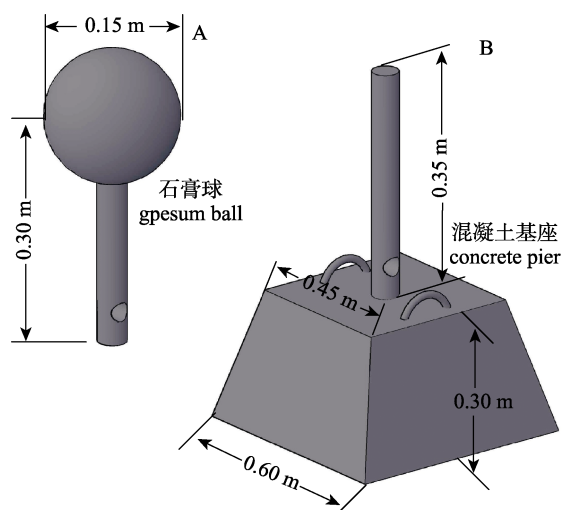


图 2 水流强度测定装置

A 为石膏球, B 为混凝土底座。

Fig. 2 Measurement of wave motion

A: gypsum sphere; B: concrete block pedestal.

1.2.3 水质参数的测定 由于水深较浅, 加之礁区上下层水流交换频繁, 各水层间化学环境因子分布均匀, 因此利用采水器采集表-底层混合水样, 4℃ 保存至实验室进行水质参数指标的测定, 包括硝酸盐 (NO_3^- -N)、亚硝酸盐 (NO_2^- -N)、铵盐 (NH_4^+ -N)、溶解活性磷酸盐 (PO_4^{3-} -P)、活性硅酸盐 (SiO_3^{2-} -Si)、化学需氧量 (COD) 和叶绿素 a (Chl-a) 等 7 项常规水质参数。上述参数的采样和测定过

程均参照《海洋监测规范》(GB 17378-2007) 进行。

1.3 数据分析

大型底栖海藻群落的生物多样性采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 表示, 物种均匀度采用 Pielou 指数 (J) 表示, 物种丰富度采用 Margalef 的种类丰富度指数 (R) 表示, 计算公式如下:

$$H' = -\sum (P_i \log_2 P_i)$$

$$J = H' / \ln S$$

$$R = (S-1) / \ln W$$

式中, S 为大型底栖海藻的种类数, W 为大型底栖海藻的总个体数, P_i 为某种大型底栖海藻生物量占总生物量的比例, 即相对生物量。

本研究采用重要值 IV (important value) 表示大型底栖海藻的优势度, 计算公式为

$$IV_i = (B_i/B) \times f_i$$

式中, IV_i 为第 i 种海藻的重要值, B_i 为第 i 种底栖海藻的生物量, B 为底栖海藻的总生物量, f_i 是第 i 种海藻的出现频率。

利用去趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA) 分析崂山湾人工礁区大型底栖海藻生物量的分布情况, 根据分析结果采用基于线性模型的冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 研究基于生物量的藻类群落和环境因子的作用关系。采用蒙特卡洛检验 RDA 排序轴的显著性, 采用 Canoco for Windows 5.0 (Biometris, Wageningen, 荷兰) 进行 DCA 和 RDA 的计算。采用 ArcGIS 10.2 (ESRI, Redlands, CA, 美国) 绘制站位布置图, 采用 Excel 2010 计算大型底栖藻类的生物量、密度和优势度等数据, 采用 PRIMER 6.0 软件包计算礁区大型底栖藻类的物种多样性, 运用 SPSS 20.0 (IBM, Chicago, IL, USA) 进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 并使用 SigmaPlot 12.5 (Systat Software, Inc., San Jose, CA, 美国) 作图, 结果采用平均值 $\pm$ 标准误 ($\bar{x} \pm \text{SE}$) 表示, 显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 崂山湾海域不同礁区环境因子时空变化

2.1.1 水流强度 对黄山口礁区和三亩前礁区不同水深和月份的水流强度进行单因素方差分析。

结果表明, 两个礁区同一水深的水流强度在不同月份差异不显著; 但不同礁区同一水深的水流强度差异极显著($P<0.01$), 黄山口礁区的水流强度明显高于三亩前礁区; 同一礁区不同水深的水流强度差异显著($P<0.05$), 表现为: $H1>H2>H3$, $S1>S2>S3$, 水流强度随着水深增加而降低(图 3)。

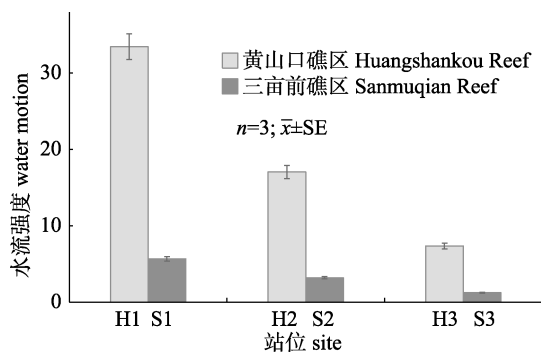


图 3 不同礁区及水深的水流强度
H1, S1: 2.89~3.27 m; H2, S2: 5.46~5.77 m; H3, S3: 7.24~7.81 m.
Fig. 3 The wave motion in different depth of reef areas

2.1.2 物理环境因子 对崂山湾海域不同礁区可能影响底栖大型海藻生长和分布的物理环境因子进行逐月调查, 结果如表 1 所示。盐度和 pH 在 5 月达到最小值, 分别为 30.96 和 7.44, 随后呈缓慢升高至平稳的趋势。三亩前礁区海水的透明度显著

高于黄山口礁区。7 月受台风影响, 崂山湾海域的海水透明度最低, 随后逐渐升高, 至 9 月达最大值。

2.1.3 化学环境因子 两个礁区表-底层混合水中总溶解无机氮、活性磷酸盐和化学需氧量等化学环境因子含量如表 1 所示, 三亩前礁区的各项化学参数含量略高于黄山口礁区, 但不同站位和不同月份之间差异均不显著($P>0.05$)。黄山口礁区总溶解无机氮的浓度范围为 0.044~0.048 mg/L, 平均浓度为 0.045 mg/L, 6 月最高, 9 月最低; 三亩前礁区总溶解无机氮的浓度范围为 0.046~0.052 mg/L, 平均浓度为 0.050 mg/L, 5 月最低, 7 月最高; 黄山口礁区活性磷酸盐的浓度范围为 0.017~0.020 mg/L, 9 月最低, 7 月最高, 平均浓度为 0.018 mg/L; 三亩前礁区的活性磷酸盐浓度范围为 0.017~0.021 mg/L, 平均浓度 0.019 mg/L。三亩前礁区水体营养盐略高于黄山口礁区, 但两个礁区的水质均符合一类水质标准。

2.2 大型底栖海藻群落结构特征

2.2.1 大型底栖海藻物种组成及生物量变化 调查期间共采集到大型底栖海藻 26 种, 隶属于 3 门 3 纲 14 目 17 科 21 属。其中以红藻门为主, 隶属于 7 目 10 科 12 属 15 种, 占总种类数的 57.69%; 褐藻门 5 目 5 科 6 属 7 种, 占 26.92%; 绿藻门 2

表 1 崂山湾不同礁区水体环境特征										
Tab. 1 Marine environmental conditions of different reef areas in Laoshan Bay										
环境变量 environmental variable	黄山口礁区 Huangshankou Reef					三亩前礁区 Sanmuqian Reef				
	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
透明度/m transparency	1.83±0.23	2.12±0.34	0.83±0.21	1.93±0.12	3.20±1.56	2.07±0.46	2.46±0.76	1.56±0.78	2.32±0.45	3.55±0.52
溶解氧/(mg/L) dissolved oxygen	7.15±0.04	8.08±0.12	8.83±0.23	3.72±0.54	4.47±0.21	5.51±0.63	8.88±0.87	4.68±1.24	4.93±0.54	7.30±0.12
温度/℃ temperature	13.54±2.14	15.75±1.85	23.24±3.14	21.66±1.59	24.17±0.58	13.31±0.77	15.82±0.12	23.46±0.54	21.56±0.02	24.12±0.25
盐度 salinity	30.96±0.89	31.18±0.56	30.99±0.78	30.99±0.32	31.00±0.47	31.00±0.12	31.15±0.17	31.00±0.08	30.97±0.26	30.99±0.12
pH	7.94±0.02	8.02±0.12	8.27±0.04	8.18±0.03	8.17±0.11	8.01±0.05	8.05±0.02	8.15±0.04	8.14±0.21	8.19±0.12
化学需氧量/(mg/L) COD	1.82±0.14	1.01±0.24	0.79±0.21	1.29±0.13	1.29±0.41	1.13±0.23	1.97±0.14	0.86±0.19	1.92±0.22	1.84±0.23
叶绿素 a/(mg/L) chlorophyll a	0.75±0.12	1.11±0.03	0.73±0.05	1.47±0.06	1.88±0.13	0.90±0.21	3.24±0.21	0.77±0.16	1.88±0.19	2.10±0.08
溶解无机氮/(mg/L) DIN	0.047±0.01	0.048±0.01	0.056±0.01	0.049±0.01	0.042±0.01	0.046±0.01	0.050±0.01	0.062±0.01	0.052±0.01	0.048±0.01
活性磷酸盐/(mg/L) SRP	0.017±0.00	0.019±0.00	0.020±0.00	0.018±0.00	0.019±0.00	0.020±0.00	0.021±0.00	0.021±0.00	0.019±0.00	0.017±0.00

目 2 科 3 属 4 种, 占 15.38%。红藻门是崂山湾海域的主要海藻类型, 包括暖温带、冷温带和亚热带种类, 其中海头红(*Plocamium telfairiae*)、扁江篱(*Gracilaria textorii*)、金膜藻(*Chrysomenia wrightii*)和小珊瑚藻(*Corallina pilulifera*)出现在多个采样点, 而异形石花菜(*Gelidium vagum*)、带形蜈蚣藻(*Grateloupia turuturu*)、叉节藻(*Amphiroa zonata*)、日本仙菜(*Ceramium japonicum*)和小石花菜(*Gelidium divaricatum*)等仅在 S2 发现。褐藻门

包括暖温带和冷温带种类, 其中裙带菜(*Undaria pinnatifida*)和舌状酸藻(*Desmarestia ligulata*)仅在黄山口海区发现, 而囊藻(*Colpomenia sinuosa*)仅出现在三亩前海区, 属于偶见种; 绿藻仅包括暖温带种类, 且只有孔石莼(*Ulva pertusa*)出现频率较高(表 2)。

崂山湾不同礁区不同水深的大型底栖藻类物种数如图 4A 所示。整体来看, 三亩前礁区的海藻种类高于黄山口礁区。各采样站位的海藻物种数

表 2 本研究采集的底栖大型海藻名录
Tab. 2 Directory of benthic marine macroalgae collected in the study

种类 species	H1	H2	H3	S1	S2	S3	温度属性 temperature attribute
红藻门 Rhodophyta							
日本异管藻 <i>Sargassum muticum</i>		+	+				WT
异形石花菜 <i>Gelidium vagum</i>					+		WT
带形蜈蚣藻 <i>Grateloupia turuturu</i>					+		WT
海头红 <i>Plocamium telfairiae</i>		+		+	+	+	CT
扁江篱 <i>Gracilaria textorii</i>			+	+	+	+	WT
金膜藻 <i>Chrysomenia wrightii</i>		+	+	+	+	+	ST
小珊瑚藻 <i>Corallina pilulifera</i>	+	+		+	+	+	ST
石花菜 <i>Gelidium amansii</i>				+	+	+	WT
叉节藻 <i>Amphiroa zonata</i>					+		ST
扇形拟伊藻 <i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>					+		WT
厚膜藻 <i>Pachymenia carnosa</i>		+			+		WT
日本仙菜 <i>Ceramium japonicum</i>					+		WT
三叉仙菜 <i>Ceramium kondoi</i>		+			+		CT
鸡毛菜 <i>Pterocladia tenuis</i>		+			+		ST
小石花菜 <i>Gelidium divaricatum</i>					+		ST
褐藻门 Phaeophyta							
裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i>	+						WT
海黍子 <i>Heterosiphonia japonica</i>				+	+	+	WT
叉开网翼藻 <i>Dictyopteris divaricata</i>	+	+		+	+	+	WT
囊藻 <i>Colpomenia sinuosa</i>					+		WT
厚缘藻 <i>Dilophus okamurae</i>	+	+		+	+	+	WT
酸藻 <i>Desmarestia viridis</i>	+	+	+	+	+	+	CT
舌状酸藻 <i>Desmarestia ligulata</i>	+	+					CT
绿藻门 Chlorophyta							
孔石莼 <i>Ulva pertusa</i>	+	+		+	+		WT
美丽刚毛藻 <i>Cladophora speciosa</i>					+		WT
石莼 <i>Ulva lactuca</i>					+		WT
缘管浒苔 <i>Enteromorpha linza</i>		+			+		WT

注: “+”表示采集到藻类; WT 表示暖温带种类; CT 表示冷温带种类; ST 表示亚热带种类。
Note: “+” stands for presence; WT: warm temperature species; CT: cold temperature species; ST: subtropical temperature species.

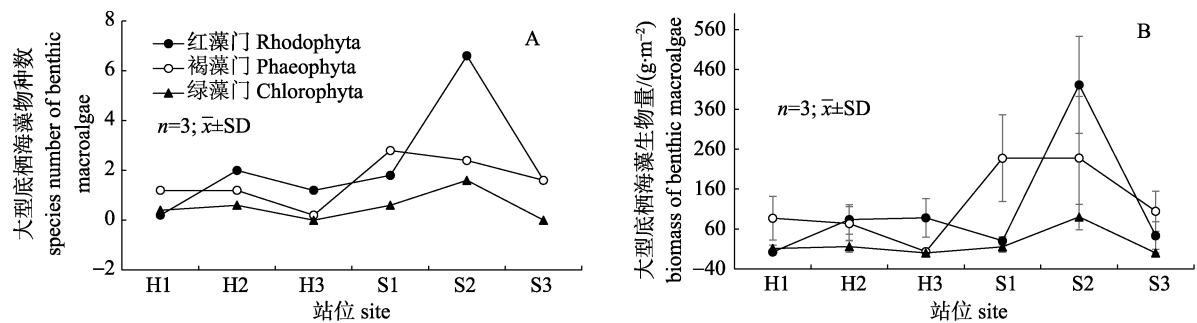


图 4 崂山湾不同站位大型底栖海藻物种数及生物量
H1, S1: 2.89~3.27 m; H2, S2: 5.46~5.77 m; H3, S3: 7.24~7.81 m.
Fig. 4 Species number and dry biomass of benthic macroalgae in different sites of Laoshan Bay

存在极显著差异($P<0.001$)。其中 S2 站位的物种数显著高于其他站位, 且红藻为优势类群; H3 站位物种数最少, 各类群物种数均较低且在调查期间未采集到绿藻门物种。在同一礁区内, 不同水深的站位海藻种类差异亦较为显著, 表现为黄山口礁区 H2 站位的物种数显著高于 H1 和 H3, 而三亩前礁区 S3 站位显著低于其他两个站位。海藻生物量在不同礁区也存在显著差异, 三亩前礁区的海藻生物量极显著高于黄山口礁区($P<0.001$, $F=7.676$)(图 4B)。海藻生物量的最高值出现在 S2 站位, 为(749.24 ± 155.13) g/m^2 , 而 H3 站位的海藻生物量最低, 为(91.09 ± 47.17) g/m^2 。同一礁区不同水深站位的海藻生物量表现出较大差异, 处于中间水层站位(H2 和 S2)的大型底栖海藻表现出较高的生物量, 深水层站位(H3 和 S3)中海藻的生物量最低, 且未采集到绿藻。

从时间序列看, 三亩前礁区和黄山口礁区的大型底栖海藻种类和生物量整体呈现先升高后降低的趋势, 其中海藻种类数在 7 月达到最大值, 以红藻门类群为优势种。黄山口礁区和三亩前礁区的生物量分别在 7 月和 8 月达到最大值, 且各月份之间差异显著($P<0.05$)。相较于 8 月, 9 月海藻的种类数和生物量显著下降。在不同月份三亩前礁区的海藻种类和生物量均高于黄山口礁区。

2.2.2 大型底栖海藻物种多样性 对崂山湾大型底栖海藻群落进行物种多样性分析, 结果如表 3 所示。结果表明, 大型底栖海藻群落的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margelef 指数在不同月份之间变化差异显著, 不同礁区同一时期的多样性指数也存在差异性。三亩前礁区的物种多样性指数

和种类丰富度指数在 8 月达到最大值, 而黄山口礁区在 8 月未采集到大型底栖海藻样品。两个礁区的均匀度指数均在 5 月为最小值, 而到 6 月达到最大值。整体来看, 三亩前礁区的物种多样性指数、种类丰富度指数和均匀度指数均大于黄山口礁区。

表 3 崂山湾不同礁区大型底栖海藻群落多样性指数
Tab. 3 Diversity indices of benthic macroalgal community in different reef zones in Laoshan Bay, Qingdao

月份 month	黄山口礁区 Huangshankou Reef			三亩前礁区 Sanmuqian Reef		
	H'	R	J'	H'	R	J'
5 月 May	0.247	0.206	0.351	1.203	0.907	0.646
6 月 June	1.234	0.630	0.870	1.540	0.953	0.853
7 月 July	0.403	0.355	0.372	1.097	0.707	0.694
8 月 August	—	—	—	1.543	1.233	0.806
9 月 September	0.497	0.402	0.405	1.250	0.867	0.765
总和 sum	2.381	1.593	1.998	6.633	4.667	3.764

注: H' 为基于海藻生物量的 Shannon-Wiener 指数, R 为 Margelef 种类丰富度指数, J' 是 Pielou 均匀度指数, “—”表示未采集到样本。
Note: H' stands for Shannon-Wiener index based on biomass; R stands for Margelef species richness index; J' stands for Pielou's evenness index; “—” stands for no sample collected.

2.2.3 大型底栖海藻优势种时空变化 崂山湾大型底栖海藻的优势种组成及其优势度变化如表 4 所示。结果表明, 崂山湾大型底栖海藻优势种在不同月份及不同水深的差异较为显著。从时间尺度分析, 春季(5 月)优势种以褐藻为主, 酸藻(*Desmarestia viridis*)从 4 月开始暴发, 于 5 月达到峰值, 是该时期的绝对优势种; 夏季(6—8 月)仍然以褐藻为绝对优势类群, 其中叉开网翼藻(*Dictyopteris divaricata*)逐渐取代酸藻, 成为夏季

表 4 崂山湾不同礁区大型底栖海藻优势度变化
Tab. 4 The change of benthic macroalgal dominance in different reef zones in Laoshan Bay

站位 site	门类 phylum	种类 species	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
H1	褐藻门 Phaeophyta	酸藻 <i>Desmarestia viridis</i>	0.740	—	—	—	—
		叉开网翼藻 <i>Dictyopteris divaricata</i>	0.003	0.017	—	—	—
		裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i>	—	0.093	—	—	—
		舌状酸藻 <i>Desmarestia ligulata</i>	—	0.079	—	—	—
	绿藻门 Chlorophyta	孔石莼 <i>Ulva pertusa</i>	—	0.064	—	—	0.188
	红藻门 Rhodophyta	小珊瑚藻 <i>Corallina pilulifera</i>	—	—	—	—	0.269
H2	褐藻门 Phaeophyta	叉开网翼藻 <i>Dictyopteris divaricata</i>	—	0.024	—	—	—
		酸藻 <i>Desmarestia viridis</i>	—	0.010	—	—	—
		舌状酸藻 <i>Desmarestia ligulata</i>	—	0.020	—	—	—
		厚缘藻 <i>Dilophus okamurae</i>	—	—	0.030	—	—
	绿藻门 Chlorophyta	长石莼 <i>Ulva linza</i>	0.002	—	0.006	—	—
		孔石莼 <i>Ulva pertusa</i>	—	0.021	—	—	—
	红藻门 Rhodophyta	金膜藻 <i>Chrysomenia wrightii</i>	0.450	—	—	—	—
		三叉仙菜 <i>Ceramium kondoi</i>	—	0.027	—	—	—
		日本异管藻 <i>Sargassum muticum</i>	—	0.040	—	—	—
		海头红 <i>Plocamium telfairiae</i>	—	—	0.001	—	0.244
H3	褐藻门 Phaeophyta	酸藻 <i>Desmarestia viridis</i>	0.105	—	—	—	—
	红藻门 Rhodophyta	金膜藻 <i>Chrysomenia wrightii</i>	0.024	0.389	0.594	—	—
		日本异管藻 <i>Sargassum muticum</i>	—	0.111	—	—	—
		扁江篱 <i>Gracilaria textorii</i>	—	—	0.048	—	1.001
S1	褐藻门 Phaeophyta	酸藻 <i>Desmarestia viridis</i>	0.126	—	—	—	—
		叉开网翼藻 <i>Dictyopteris divaricata</i>	0.034	0.100	0.129	0.159	—
		海黍子 <i>Heterosiphonia japonica</i>	0.044	0.025	0.182	0.021	0.013
		厚缘藻 <i>Dilophus okamurae</i>	—	—	0.019	0.006	0.203
	绿藻门 Chlorophyta	孔石莼 <i>Ulva pertusa</i>	0.054	—	—	—	0.001
	红藻门 Rhodophyta	海头红 <i>Plocamium telfairiae</i>	—	—	—	0.008	0.029
S2	褐藻门 Phaeophyta	小珊瑚藻 <i>Corallina pilulifera</i>	—	—	—	—	0.055
		酸藻 <i>Desmarestia viridis</i>	0.013	0.003	—	—	—
		叉开网翼藻 <i>Dictyopteris divaricata</i>	0.011	0.244	—	0.014	—
		海黍子 <i>Heterosiphonia japonica</i>	0.007	0.003	0.011	0.013	—
	绿藻门 Chlorophyta	孔石莼 <i>Ulva pertusa</i>	0.030	0.041	0.001	0.007	0.065
		缘管浒苔 <i>Enteromorpha linza</i>	—	—	—	0.016	—
	红藻门 Rhodophyta	石花菜 <i>Gelidium amansii</i>	0.007	0.021	0.012	0.002	—
		小珊瑚藻 <i>Corallina pilulifera</i>	0.006	0.002	—	0.023	0.044
		日本仙菜 <i>Ceramium japonicum</i>	0.019	—	—	—	—
		金膜藻 <i>Chrysomenia wrightii</i>	0.001	0.091	0.001	—	—
		海头红 <i>Plocamium telfairiae</i>	0.004	—	0.002	0.008	0.010
		扁江篱 <i>Gracilaria textorii</i>	0.008	0.013	0.001	0.003	—
		带形蜈蚣藻 <i>Grateloupia turuturu</i>	—	0.027	0.013	—	—
		三叉仙菜 <i>Ceramium kondoi</i>	—	0.014	0.001	0.001	0.010
		鸡毛菜 <i>Pterocladia tenuis</i>	—	0.003	—	—	0.014
		厚膜藻 <i>Pachymenia carnosa</i>	—	—	—	0.002	0.014

(待续 to be continued)

(续表 4 Tab. 4 continued)

站位 site	门类 phylum	种类 species	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
S3	褐藻门 Phaeophyta	叉开网翼藻 <i>Dictyopteris divaricata</i>	0.017	0.484	0.043	—	—
		酸藻 <i>Desmarestia viridis</i>	0.464	—	—	—	—
		海黍子 <i>Hterosiphonia japonica</i>	—	—	0.036	—	—
		厚缘藻 <i>Dilophus okamurae</i>	—	—	0.008	0.240	0.127
	红藻门 Rhodophyta	金膜藻 <i>Chrysomenia wrightii</i>	0.001	0.219	—	—	—
		扁江篱 <i>Gracilaria textorii</i>	—	0.072	—	—	0.326
		小珊瑚藻 <i>Corallina pilulifera</i>	—	—	—	0.084	—
		石花菜 <i>Gelidium amansii</i>	—	—	—	0.029	0.001

注: “—”表示未采集到样品。
Note: “—” means no samples were collected.

的第一优势种, 红藻门的金膜藻和日本异管藻 (*Sargassum muticum*) 逐渐上升为主要优势种; 秋季(9月)红藻门海藻取代了褐藻的生态位, 扁江篱成为第一优势种。从时间尺度分析, 两个礁区的藻类群落均呈现以褐藻向红藻演替的规律, 优势种差异不明显。但不同水深的藻类群落优势度差异明显, 其中深水区优势种差异最大, H3 以红藻门的扁江篱和金膜藻为主要优势种, 而 S3 则以褐藻门的叉开网翼藻、厚缘藻(*Dilophus okamurae*) 和酸藻为主要优势种。两个礁区的中层区(H2 和 S2)均以红藻门藻类出现频率较高; H2 中金膜藻和小珊瑚藻的优势度较高, 为该区域的优势种; 但 S2 中红藻门藻类优势度不明显, 以褐藻门的叉开网翼藻为主要优势种。浅水区(H1 和 S1)主要以褐藻门的藻类为主, 但绿藻门的孔石莼在秋季也逐渐成为了浅水区的优势种。

2.3 大型底栖海藻生物量与环境的相互作用

DCA 分析中 4 个排序轴的梯度值分别为 1.366、1.282、1.320 和 0.000, 前三轴的梯度值均小于 3, 属于线性分布, 因此采用基于线性模型的冗余分析研究藻类群落和环境因子的相互作用关系^[17], 结果如图 5 所示。9 个环境因子对崂山湾大型底栖海藻的分布变化解释率为 67.5%, 前两轴累计解释了 60.5 % 的物种变化信息。由图 5 可知, 水深、水流强度、温度和总溶解无机氮同第一轴的相关性较强, 而叶绿素 a 和可溶性磷酸盐同第二轴相关性较强; 绿藻门和褐藻门的藻类生物量主要受第一轴的影响; 而红藻门主要受第

二轴影响。影响崂山湾大型底栖藻类群落变化的环境因子中, 前三位分别为水深、水流强度和温度, 对群落变化的解释率分别为 47.6%、28.9%和 16.7%; 其中褐藻门和绿藻门种类的生物量同水体盐度、水深和水流强度具负相关性, 和温度、酸碱度和总溶解无机氮具正相关性。红藻门种类的生物量同水体叶绿素 a 含量和透明度具有正相关性, 与水流强度和可溶性磷酸盐具有负相关性。蒙特卡洛置换检验($P<0.05$)结果表明, 温度是影响不同藻类月际更替的主要因素, 其与物种生物量的相关系数为 0.729, 对变量的解释率为 37.64%。水流强度和水深是影响不同礁区和水层中大型底栖藻类的主要环境因子, 相关系数分别是 0.668 和 0.589, 对物种变量的解释率分别为 26.54%和 19.13%。

3 讨论

3.1 大型底栖海藻群落组成

岩礁为底栖藻类的繁衍和生长提供了良好的附着条件。人工礁区中底栖海藻群落的形成、发展和成熟过程主要经历了绿藻→红藻→褐藻的演替顺序。通常, 礁区中出现大量褐藻标志着海藻群落趋于稳定, 成为顶级群落^[18]。本研究对比分析了青岛崂山湾黄山口和三亩前两处礁区不同水深的大型底栖藻类群落结构、物种多样性和优势度变化。调查期间, 在不同礁区均采集到褐藻门藻类, 表明礁区的藻类群落已经发展至成熟群落, 但以红藻门海藻为主, 褐藻门次之, 绿藻门仅在

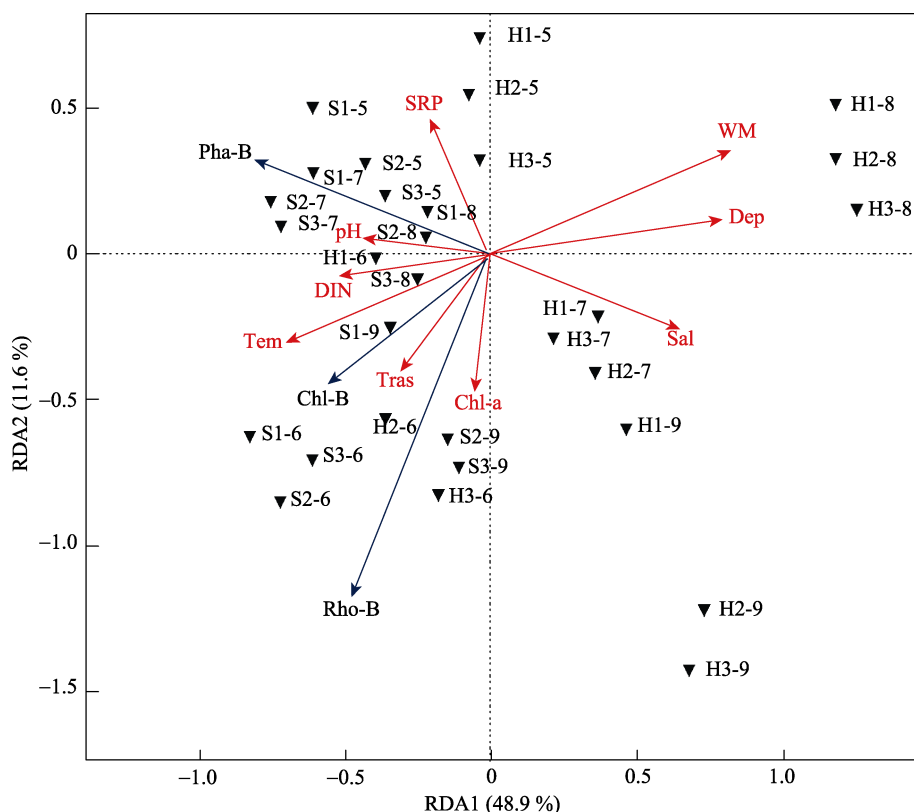


图 5 大型底栖海藻与环境因子 RDA 分析双序图

WM 表示水流强度, Dep 表示水深, Sal 表示盐度, Chl-a 表示叶绿素 a, Tras 表示透明度, Tem 表示水温, pH 表示酸碱度, DIN 表示总溶解无机氮, SRP 表示溶解活性磷酸盐, Pha-B 表示褐藻生物量, Chl-B 表示绿藻生物量, Rho-B 表示红藻生物量。

Fig. 5 The biplots of benthic macroalgae and environment variables based on RDA

WM stands for wave motion, Dep for depth, Sal for salinity, Chl-a for chlorophyll a, Tras for transparency, Tem for temperature, pH for power of hydrogen, DIN for total dissolved inorganic nitrogen, SRP for soluble reactive phosphorus, Pha-B for phaeophyta biomass, Chl-B for chlorophyta biomass, and Rho-B for phaeophyta biomass.

浅水层发现且均为温暖性种类。本研究结果同威海双岛湾^[19]、荣成俚岛^[20]、烟台养马岛^[13]和浙江马鞍列岛^[5]等海域的调查结果类似。海藻样品中共有 17 种暖温带种类、5 种亚热带种类以及 4 种冷温带种类, 与我国北方海域大型海藻区系分布一致^[21]。我国黄渤海区的温度性质决定了底栖大型海藻区系的组成以暖温带种类为主, 其次为亚热带和冷温带种类。

从时间尺度分析, 从 5 月到 9 月, 崂山湾礁区内藻类群落主要呈现褐藻逐渐被红藻替代的演替过程。4 月褐藻门的酸藻在礁区内大面积暴发, 至 5 月达到高峰值, 6 月中旬, 礁区内酸藻退化, 其他海藻生物量得以不同程度地恢复。由于红藻门类群体内含有红藻素, 能够有效利用蓝光进行光合作用, 即使在较深水层仍能够正常存活。因此

7—9 月, 红藻是大型底栖藻类中数量最多、分布最广的群体^[21]。从空间尺度分析, 三亩前礁区的大型底栖藻类生物量和物种数均高于黄山口礁区。黄山口礁区水域开阔, 受季风和水动力作用影响较大, 礁区水体易发生剧烈搅动, 特别是 7 月和 8 月受台风影响, 黄山口礁区波浪和水流变化剧烈, 整个礁区海水混浊度极高, 海水透明度降低, 不利于海藻的光合作用。此外, 黄山口礁区的水流强度显著高于三亩前礁区(图 3), 较大的水流强度能减少藻类孢子体的沉降, 仅有少量附着黏度较高的孢子体能迅速黏附到礁体上^[22]; 同时较高的水流强度也易导致藻体的剥离, 从而降低礁区藻类的多样性。三亩前海域属于半封闭型海湾, 受水动力作用影响较弱, 水体透明度高, 水流强度较小, 为藻类的附着和生长提供了较为优越的条件。

3.2 优势种及物种多样性变化

调查结果表明, 崂山湾礁区的优势种在不同月份间差异显著, 其月份间的变化特点是: 相邻月份间具有共同优势种, 但优势度差异较大, 而监测调查的5个月份间无共同优势种。例如, 酸藻在5月是第一优势种, 在两个礁区均有出现且生物量较大; 但在6月, 酸藻的优势地位被叉开网翼藻取代; 金膜藻是夏季的第一优势种, 但在秋季未采集到金膜藻样本。分析认为, 由于不同藻类的生理生态适应性不同, 采样期间随着温度和其他环境条件的变化, 群落中的优势功能地位被不同生态位的藻类不断更替。例如, 酸藻属于冷温性种类, 其在大连獐子岛和凤鸣岛的暴发时期一般是5月到6月初^[23-24], 由于崂山湾水温上升较快, 酸藻在4月便达到其生长旺盛期, 5月成为第一优势种。酸藻是世界上公认的有害藻类, 其大面积暴发能改变局部海水水质, 影响藻类和其他海洋生物的生存或抑制其他底栖藻类的生长^[25], 这也是导致春末夏初两个礁区海藻生物量和物种多样性指数较低的原因之一。但随着海水温度的进一步升高, 酸藻逐渐被温暖性藻类所替代。

物种多样性指数可以定量反映生物群落的空间分布特征, 能够为分析群落演替规律和对环境的响应提供科学参考^[26]。除7月外, 两个礁区的物种多样性指数均呈现先升高后降低的规律。7月由于受到台风灿鸿的影响, 两个礁区的物种多样性指数显著下降, 分析原因可能是台风引发的风浪将部分固着能力较低的底栖藻类冲走或物理损伤, 造成礁区物种多样性的下降。

3.3 环境因子对大型底栖藻类的影响

影响人工礁区大型底栖藻类生长和分布的因素很多, 基于海藻生物量的RDA排序结果显示, 影响崂山湾礁区大型底栖海藻更替和分布的前三位环境因子分别是水流强度、水深和温度。其中水流强度和水深主要影响不同礁区水平和垂直方向的藻类分布, 而温度主要影响藻类的月际更替。烟台养马岛^[13]和荣成俚岛^[20]的调查结果表明, 营养盐和pH是影响藻类分布的主要环境因子。在本研究中, 营养盐和pH等对藻类分布的影响不显著, 分析认为人工礁区形成的涌升流和背涡

流致使上下水层混合充分, 各水层间水质差异不大, 对藻类的分布和更替未造成显著影响。监测发现, 两个礁区的水体溶解氧在8月普遍低于其他月份, 推测与礁区大面积被浒苔覆盖及其腐败分解等影响有关。若礁区发生浒苔腐败沉降, 将对大型底栖藻类产生何种影响, 有待进一步监测研究。

水流强度指数可以间接反映藻类受到波浪和水流作用的大小^[16]。波浪主要引起底质沉积物的再悬浮, 降低水体透明度, 从而影响海藻的生长和分布, 而较强的水流对藻体造成物理损伤, 抑制藻体和孢子体附着于礁体上^[27]。在本研究中, 三亩前礁区较黄山口礁区隐蔽, 水流强度较弱, 水体透明度显著高于黄山口, 为海藻生长提供了较好的光照和附着条件; 而黄山口水域开阔, 特别是受夏季东南季风的影响显著, 水流强度较大且水体浑浊, 严重影响了该礁区底栖藻类的附着和生长。此外, 不同水深的水流强度差异极显著, 浅水区的水流强度显著高于深水区。分析认为, 水流强度和光照限制共同影响了崂山湾人工鱼礁区大型底栖海藻的种类组成与分布。

参考文献:

- [1] 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. [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.]
- [2] Martínez B, Arenas F, Rubal M, et al. Physical factors driving intertidal macroalgae distribution: physiological stress of a dominant furoid at its southern limit[J]. Oecologia, 2012, 170(2): 341-353.
- [3] Duarte C M, Losada I J, Hendriks I E, et al. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(11): 961-968.
- [4] Zhang S Y, Sun H C. Research progress on seaweed bed ecosystem and its engineering[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(7): 1647-1653. [章守宇, 孙宏超. 海藻场生态系统及其工程学研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1647-1653.]
- [5] 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. [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.]
- [6] Gallego-Fernández J B, Sánchez I A, Ley C. Restoration of isolated and small coastal sand dunes on the rocky coast of northern Spain[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(11): 1822-1832.
- [7] Wells E, Wilkinson M, Wood P, et al. The use of macroalgal species richness and composition on intertidal rocky seashores in the assessment of ecological quality under the European Water Framework Directive[J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, 55(1-6): 151-161.
- [8] Juanes J A, Guinda X, Puente A, et al. Macroalgae, a suitable indicator of the ecological status of coastal rocky communities in the NE Atlantic[J]. Ecological indicators, 2008, 8(4): 351-359.
- [9] Munda I M. Gradient in seaweed vegetation patterns along the North Icelandic coast, related to hydrographic conditions[J]. Hydrobiologia, 1992, 242(3): 133-147.
- [10] Stiger V, Payri C E. Spatial and temporal patterns of settlement of the brown macroalgae *Turbinaria ornata* and *Sargassum mangarevense* in a coral reef on Tahiti[J]. Marine Ecology Progress Series, 1999, 191: 91-100.
- [11] Colvard N, Helmuth B. Nutrients influence the thermal ecophysiology of an intertidal macroalga: multiple stressors or multiple drivers?[J]. Ecological Applications, 2017, 27(2): 669-681.
- [12] Patarra R F, Carreiro A S, Llovetas A A, et al. Effects of light, temperature and stocking density on *Halopteris scoparia* growth[J]. Journal of Applied Phycology, 2017, 29(1): 405-411.
- [13] Han Q Y, Yin X B, Liu D Y. Distribution of macroalgal community and environmental effects in Yangma Island, Yantai, Shandong Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(12): 3655-3663. [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.]
- [14] Chen Z Q, Shou L, Liao Y B, 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. [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.]
- [15] Wu Z X, Zhang X M, Zhang L, et al. Structure and function of Lidao artificial reef ecosystem in Rongcheng of Shandong Province, East China: An evaluation based on Ecopath model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2878-2886. [吴忠鑫, 张秀梅, 张磊, 等. 基于 Ecopath 模型的荣成俚岛人工鱼礁区生态系统结构和功能评价[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2878-2886.]
- [16] Fulton C J, Bellwood D R. Wave-induced water motion and the functional implications for coral reef fish assemblages[J]. Limnology and Oceanography, 2005, 50(1): 255-264.
- [17] Eriksson B K, Bergström L. Local distribution patterns of macroalgae in relation to environmental variables in the northern Baltic Proper[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2005, 62(1-2): 109-117.
- [18] Ar Gall E, Le Duff M. Development of a quality index to evaluate the structure of macroalgal communities[J]. Estuarine, Coastal & Shelf Science, 2014, 139: 99-109.
- [19] Liu G S, Tong F, Cai X Y, et al. Variation in the macroalgae community structure during summer in the artificial reef zones of Shuangdao Bay, Weihai, Shandong Province, China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(5): 1010-1019. [刘国山, 佟飞, 蔡星媛, 等. 威海双岛海域人工鱼礁区大型海藻夏季群落结构变化[J]. 中国水产科学, 2014, 21(5): 1010-1019.]
- [20] Zhang L, Zhang X M, Wu Z X, et al. Effect of environment on benthic macro-algal communities of artificial reefs in Lidao, Rongcheng[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(1): 116-125. [张磊, 张秀梅, 吴忠鑫, 等. 荣成俚岛人工鱼礁区大型底栖藻类群落及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2012, 19(1): 116-125.]
- [21] Zeng C K, Zhang J F. A preliminary analytical study of the Chinese marine algal flora[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1963, 5(3): 245-253. [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.]
- [22] Taylor D I, Schiel D R. Wave-related mortality in zygotes of habitat-forming algae from different exposures in southern New Zealand: the importance of 'stickability'[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2003, 290(2): 229-245.
- [23] Jia X B. Thirty years changes of benthic algae in intertidal zone of Zhangzi Island[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2016: 29-33. [贾潇博. 獐子岛潮间带底栖海藻三十年变迁[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2016: 29-33.]
- [24] Zhao F, Xu N, Zhou R, et al. Community structure and species diversity of intertidal benthic macroalgae in Fengming Island, Dalian[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): 77-84.
- [25] Molis M, Wessels H, Hagen W, et al. Do sulphuric acid and the brown alga *Desmarestia viridis* support community structure in Arctic kelp patches by altering grazing impact, distribution patterns, and behaviour of sea urchins?[J]. Polar Biology, 2009, 32(1): 71-82.
- [26] Cousins S H. Species diversity measurement: Choosing the right index[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1991, 6(6): 190-192.
- [27] Flores A A V, Christofolletti R A, Peres A L F, et al. Interactive effects of grazing and environmental stress on macroalgal biomass in subtropical rocky shores: Modulation of bottom-up inputs by wave action[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2015, 463: 39-48.

Spatial-temporal variations of benthic macroalgae and their responses to variations in the environment in the artificial reef zones of Laoshan Bay

YANG Xiaolong¹, LYU Hongbin¹, HU Chengye¹, ZHANG Xiumei^{1,2}

1. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education; Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Function Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266003, China

Abstract: Benthic macroalgae are highly productive and increase biodiversity through the provision of a habitat for marine organisms and act as spawning, nursery, and feeding grounds for an extensive range of marine fauna. As a dominant habitat-former on temperate rocky coastlines, benthic macroalgae are important fundamental species in the temperate marine climate owing to their high productivity and extensive distribution. However, the loss of benthic macroalgal habitats has been widespread along the rocky coastlines owing to various perturbations, including climate change, species invasion, sedimentation increase, and anthropogenic stress. The establishment of artificial reefs have been proven an efficient approach for the recovery of the benthic macroalgae ecosystem. For the past three decades, the habitats of benthic macroalgae in Laoshan Bay of Qingdao have been destroyed by anthropogenic activities such as mariculture and fisheries. To mitigate the habitat losses of benthic macroalgae and restore the spawning grounds, artificial rocky reefs were deployed in two coastal areas, Huangshankou, which has high levels of wave motion and Sanmuqian, which has low levels of wave motion, between 2009 and 2010. After the deployment of artificial reefs, the marine habitats underwent a long-term and dynamic process prior to the formation of stable ecosystems. The inter-month variation and distributional pattern of benthic macroalgal communities were a reflection of the self-adaptation of the ecosystem to the changing conditions. To study the community characteristics, inter-monthly variation, and response to the environmental factors of benthic macroalgae in the artificial reef zones, the horizontal and vertical distribution of the benthic macroalgae in two artificial reef zones were investigated between May and September 2015. Wave motion indexes between the two artificial reef zones showed extremely significant differences, whereas similar conditions were found among different wave depths in the same artificial reef zones. The temperature range between May and November showed significant variation, whereas no significant difference was found between artificial reef zones at same the time. A total of 26 species of 21 genera, belonging to three phyla were found; among these, 15 species belonged to Rhodophyta, 7 species belonged to Phaeophyta, and 4 species belonged to Chlorophyta, which accounted for 57.69%, 26.92%, and 15.38% of the total, respectively. The replacement of benthic macroalgal species in different months displayed significant differences: *Desmarestia viridis*, *Chrysomenia wrightii*, and *Gracilaria textorii* were the predominant species during spring, summer, and autumn, respectively. The species diversity indices of benthic macroalgae increased at first and decreased subsequently, whereas the indices in Sanmuqian reef zone were generally higher than those in Huangshankou Reef zone. Differences in the species diversity indices and the dominant species in different months were mainly caused by temperature variations and different temperature adaptability of macroalgal species. Redundancy analysis further proved that temperature was the key influential factor in the monthly replacement of benthic macroalgae and contributed to 37.64% of the variation, whereas wave motion and depth were the key influencing factors in the horizontal and vertical distribution of benthic macroalgae and accounted for 26.54% and 19.13% of the variation, respectively. The results indicated that the artificial reefs provided efficient substrates for benthic macroalgae in Laoshan Bay. The benthic macroalgal communities showed relative stable seasonal perturbation in the artificial reefs, which reach maturity and have the ability to withstand the external disturbances 5 years after deployment of the artificial reefs.

Key words: Laoshan Bay; benthic macroalgae; artificial reef; wave motion; intermonth dynamic

Corresponding author: ZHANG Xiumei. E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn