

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2012.00116

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

张磊, 张秀梅, 吴忠鑫, 张沛东

中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003

摘要: 2009 年 8 月–2010 年 8 月间, 每隔 2 个月对荣成俚岛人工鱼礁区投放 3 年后的 2 种人工鱼礁及自然礁石上附着的大型藻类进行潜水采样调查, 分析藻类群落演替规律及其与环境因子的关系。结果表明, 采集到附着藻类共 3 门 13 种, 其中红藻门(Rhodophyta)藻类的种类数最多(6 种), 褐藻门(Phaeophyta)藻类的平均生物量最大(92.724 g/m²)。人工鱼礁上附着的藻类群落渐趋成熟; 夏秋季藻类种类数和生物量均高于春冬季。聚类分析和去趋势对应分析(DCA)表明, 石块礁和自然礁石上藻类群落结构相似度(83.1%)较高, 其生物量及群落多样性指数均高于混凝土礁体。主成分分析(PCA)和冗余分析(RDA)结果表明, 水温是影响藻类群落变化的最主要因子, 对藻类群落变化的解释量达到 47.6%。影响自然礁石上藻类群落变化的次要因子为 N、P 营养盐, 而影响石块礁和混凝土礁体上藻类群落变化的次要因子为 pH 和溶解氧。

关键词: 大型底栖藻类群落; 人工鱼礁; 去趋势对应分析; 主成分分析; 冗余分析

中图分类号: S93

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2012)01–0116–10

大型底栖藻类具有重要的生态功能和经济价值, 是浅海生态系统的重要组成部分。近年来, 由于人类用海活动日益加剧、沿海工农业污染加重, 海藻的生境受到了严重破坏, 海藻场日趋退化。20 世纪 80 年代以前, 青岛前海大黑拦海区 3~6 m 水深范围内, 以石花菜为优势种群的海藻资源量十分丰富, 平均生物量可达 1~2 kg/m²。到 80 年代后期, 由于填海造地等人为破坏, 石花菜种群濒临绝迹^[1]。美国加州沿岸的天然藻场资源一度十分丰富, 1910 年起海藻被大规模开采用于生产钾肥和褐藻胶, 致使藻场迅速衰退, 目前只能从墨西哥移植巨藻来恢复沿岸藻场^[2]。随着世界范围内的藻场退化, 许多国家都开展了受损海藻场的修复行动^[3–5]。

探究藻类群落演替规律对藻场的修复十分必要。目前, 国内外对天然底栖藻类的群落动态研究较多, 澳大利亚的 Daven 等^[6]研究了维多利亚

港西部的藻类群落, 发现优势藻类为红藻, 且随着水深的变化, 藻类群落结构也随之发生变化; Ngan 等^[7]在 1980 年调查了澳大利亚东部汤斯维尔附近热带海域潮间带的藻类群落, 共发现了 144 种底栖藻类, 以红藻门种类数最多, 且藻类群落呈带状分布。Gunnarsson 等^[8]在 1992–1995 年间逐月对冰岛西南海域潮间带底栖藻类的覆盖率进行取样调查, 发现藻类的季节变化规律在年际间表现一致, 多数藻类的覆盖率在 3 月份增大, 5 月份减小, 但有些种类可以一直增大至深秋, 认为藻类群落的季节变化受营养盐水平制约而与温度无关。近年来, 中国沿海各省市也对近岸大型底栖海藻的种类分布与资源特征等进行了相关调查, 积累了一系列研究数据^[9–14]。

目前, 国内外通用的藻场修复手段主要有移植海藻、去除敌害生物以及投放人工藻礁等, 其中投放人工藻礁是最常用的方法^[15]。本研究通过

收稿日期: 2011–07–08; 修订日期: 2011–09–20.

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目(200805069).

作者简介: 张磊(1985–), 男, 硕士研究生, 从事人工鱼礁、人工鱼礁的研究. E-mail: zlazxf@126.com

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

调查荣成俚岛近岸海域人工鱼礁区内石块礁与混凝土礁投放 3 年后的藻类附着情况, 并与该海区自然礁石上附着的藻类进行对比分析, 评价混凝土和石块 2 种礁体上藻类附着效果, 探讨大型底栖藻类群落变化与礁区水质理化因子的关系, 以期为人工藻场建设与养护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集地点概况

俚岛人工鱼礁区(图 1)位于黄海北部, 南起马他角, 北至俚岛湾东端外遮岛之间的海域。2006 年, 高绿水产有限公司在该海域投放石块礁 75 万块、A 字型混凝土构件礁 13 015 件, 形成礁群 12 个。该海域为沙砾底质, 平均水深小于 10 m。

1.2 样品采集及数据分析方法

选取投放 3 年后的石块礁、混凝土 A 字型构件礁作为研究对象, 并以海底自然礁石作为对照。2009 年 8 月至 2010 年 8 月间每隔 2 个月进行一次附着藻类潜水取样。具体取样方法为: 用 50 cm × 60 cm 的 PVC 管制矩形采样框, 在 3

种礁体上随机选取 3 个样方, 用铲刀采集所有附着的大型底栖藻类, 带回实验室鉴定种类后用天平称重, 计算每种藻类的生物量密度。

利用便携式溶氧仪(YSI DO-200)、pH 计、盐度计等测定礁区水域溶解氧(DO)、pH、盐度、表层水温和水深。依据《海洋监测规范》和《海洋调查规范》对氨氮(NH₄-N)、磷酸盐(PO₄-P)、硅酸盐(SiO₃-Si)、叶绿素 a(Chl a)等指标进行采样测定。

利用 PRIMER 5(Plymouth Routines In Multivariate Ecological Research)软件计算不同礁体上附着藻类群落的多样性参数, 计算藻类样方的相似度(Bray-Curtis similarity), 并据此做样方的树型聚类图。其中, 主要群落参数计算公式如下:

Margalef 的种类丰富度指数: $R = (S - 1) / \ln W$

Shannon-Wiener 多样性指数: $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$

Pielou 均匀度指数: $J' = H' / \ln S$

式中 S 为藻类种类数, W 为附着藻类的生物量密度, P_i 为单位面积某种藻类生物量占总生物量的比例。

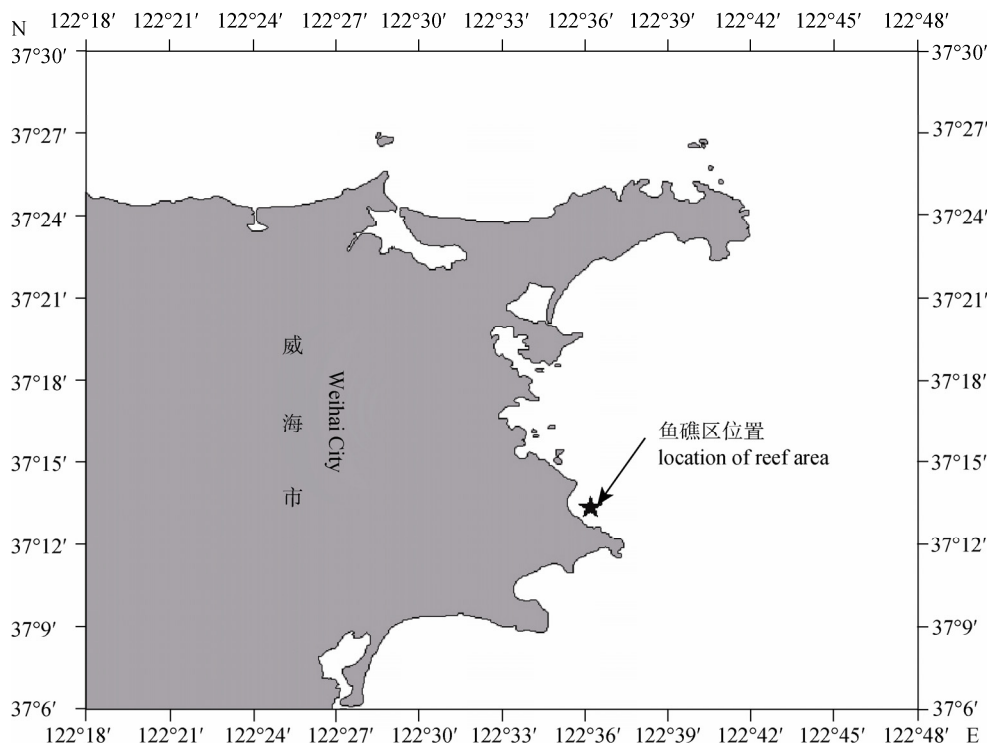


图 1 样品采集地点

Fig. 1 Sampling locality in this investigation

利用 CANOCO4.5(Canonical Community Ordination)软件对藻类群落和环境因子进行去趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)、主成分分析(Principal Components Analysis, PCA)和冗余分析(Redundancy Analysis, RDA),以研究藻类群落结构与环境因子的相关关系。

2 结果与分析

2.1 附着藻类的种类组成、生物量及季节变化

经过 5 次潜水采样调查,共发现 3 门 13 种大型底栖海藻,其中绿藻门(*Chlorophyta*)3 种,红藻门(*Phodophyta*)6 种,褐藻门(*Phaeophyta*)4 种(表 1)。褐藻门藻类生物量密度最大,全年平均值为 92.724 g/m^2 。历次取样中,2010 年 8 月石块礁上附着藻类生物量密度最大,藻类生物量达 309.62 g/m^2 ,而 2010 年 3 月自然礁石上附着藻类的生物量密度最小,藻类生物量为 43.04 g/m^2 ;2009 年 8 月自然礁石上以及 2010 年 8 月石块礁和自然礁石上附着藻类的种类数最多,均发现 13 种藻类,而 2010 年 3 月、5 月混凝土礁上附着藻类的种类数最少,只有 4 种藻类。藻类生物量密度依季节由高到低依次为:夏季(171.45 g/m^2)、秋季(154.13 g/m^2)、冬季(90.75 g/m^2)、春季(82.86 g/m^2)(图 2)。其中,红藻门藻类与藻类群落总生物量密度的季节变化趋势一致;而绿藻门藻类冬季的生物量密度(1.56 g/m^2)低于春季(4.41 g/m^2),褐藻门藻类秋季的生物量密度(114.05 g/m^2)高于夏季(107.10 g/m^2)。同季节不同礁体藻类生物量密度由高到低依次为:石块礁(178.98 g/m^2)、自然礁石(105.98 g/m^2)、混凝土礁(89.43 g/m^2)(图 3);不同礁体上附着藻类生物量密度的季节变化趋势大致相同,为夏秋季高,冬春季低。

2.2 附着藻类的群落结构特征及聚类分析

根据藻类群落参数可知(表 2),同一季节,混凝土礁体上附着藻类群落的 Margelf 物种丰富度指数和多样性指数低于另外 2 种礁体,自然礁石上附着藻类群落的均匀度指数略低于另外 2 种礁体,但差异不显著;夏、秋季藻类群落的多样性指数高于春、冬季。

Cluster 聚类图显示,3 种礁体 5 次采集的 15 个样方分为两大支,冬季样方聚为一支,其余三季样方聚为另一支(图 4)。在夏、春、秋三季样方中,夏、秋季相同礁体的样方分别聚类,即石块礁藻类样方首先与自然礁石的样方聚类,之后与混凝土礁体的样方聚类;夏、秋季样方聚类后与春季样方聚类。在同种礁体样方中,2009 年夏季与 2010 年夏季的藻类群落相似性较高,在树状图上首先聚类,然后与 2009 年秋季的藻类群落聚类。春季石块礁样方和自然礁石样方聚为一支后又与冬季的石块礁样方聚为一支,而春、冬季混凝土礁样方与冬季自然礁样方及其他样方相异性较大,单独聚为一支。

2.3 附着藻类的群落动态与环境因子的关系

采用 DCA 分析对 3 种礁体 5 次采集的 15 个样方进行分析,结果表明,4 个排序轴的特征值分别为 1.309、0.841、0.538 和 0.658,第 1 轴特征值最大,体现了最多的生态信息,第 2 轴次之。根据样方在前两轴的得分做二维排序图(图 5),图中各样点分布的范围和界限表明,Cluster 聚类分析得出的各样方相似性与 DCA 排序完全吻合。从排序轴上看,藻类群落沿第 1、2 轴均有明显的梯度变化,冬季的样点在排序图中位于第 1 轴的左端,而其余 3 个季节的样点则位于第 1 轴的右端。

DCA 排序结果显示,4 个排序轴长度均小于 4,藻类群落变化与环境因子的关系符合线性模型。综合 9 个环境因子组成的 9×15 矩阵以及藻类群落生物量矩阵进行 PCA 分析,并据此做藻类种类与环境因子的 PCA 排序图(图 6),从各环境因子之间及其与排序轴的相关系数矩阵可以看出,两个排序轴共解释了 87.9%的群落变化,其中与第 1 轴相关性高的环境因子为水温(Tem)、溶解氧(DO)与硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$);与第二轴相关性高的为 N、P 营养盐。绿藻门的孔石莼(*Ulva pertusa kjellm*)、肠浒苔(*Enteromorpha intestinalis*),红藻门的角叉菜(*Chondrus ocellatus*)、真江蓠(*Gracilaria asiatica*)以及褐藻门的海带(*Laminaria japonica*)和海黍子(*Sargassum muticum*)受第 1 轴影响较大,即与水温的相关性较高。褐藻门的鼠尾藻(*Sargassum thunbergii*)

表 1 3 种礁体不同季节附着藻类的生物量密度分布
Tab. 1 Biomass density of algae attached on three kinds of reefs in different seasons

物种 species	2009-08			2009-11			2010-02			2010-05			2010-08		
	C	R	N	C	R	N	C	R	N	C	R	N	C	R	N
肠浒苔 <i>Enteromorpha intestinalis</i>	7.43	10.21	5.28	3.24	4.65	1.76	0	0	0	0	0.04	0.05	8.42	11.34	4.38
孔石莼 <i>Ulva pertusa kjellm</i>	10.13	14.26	7.84	8.71	12.19	7.32	1.53	2.22	0.93	4.28	5.12	3.75	12.14	15.21	8.54
羽藻 <i>Bryopsis plumosa</i>	0	0.06	0.11	0	0.04	0.02	0	0	0	0	0	0	0	1.04	0.57
石花菜 <i>Gelidium amansii</i>	2.41	4.31	2.14	4.14	10.21	9.14	15.32	19.76	10.14	6.24	9.15	8.1	5.57	10.24	5.48
鸡毛菜 <i>Pterocladia capillacea</i>	0	0	0.14	0	1.35	0.16	0	1.14	0.43	0	3.41	2.15	0	1.24	0.24
三叉仙菜 <i>Ceramium rubrum</i>	0	0.13	0.08	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0	1.05	0.13
角叉菜 <i>Chondrus ocellatus</i>	18.21	24.19	10.25	3.16	10.23	6.78	0	0	0	0	4.05	2.12	20.14	26.54	13.52
繁枝蜈蚣藻 <i>Grateloupia ramosissima</i>	0	0.14	0.21	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0.03	0	1.25	1.05
真江蓠 <i>Gracilaria asiatica</i>	20.37	21.35	10.64	10.73	17.18	9.17	0	5.13	1.15	0	7.14	1.17	23.14	31.52	13.47
海黍子 <i>Sargassum muticum</i>	23.15	73.28	43.26	21.16	63.28	34.12	10.43	15.74	11.27	12.14	16.27	9.78	24.54	76.24	44.12
鼠尾藻 <i>Sargassum thunbergii</i>	0	17.74	10.16	0	10.45	7.64	0	5.13	0	0	8.71	2.45	10.14	20.51	19.24
海带 <i>Laminaria japonica</i>	25.67	31.18	19.12	47.15	63.21	37.25	53.14	62.14	42.45	31.29	48.18	37.21	28.31	29.24	22.17
裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i>	10.4	18.6	16.8	0	32.5	25.4	0	14.2	0	0	15.4	10.2	0	54.2	24.5

注: C.混凝土礁; R.石块礁; N.自然礁石.
Note: C.concrete reefs; R.rock reefs; N.natural reefs.

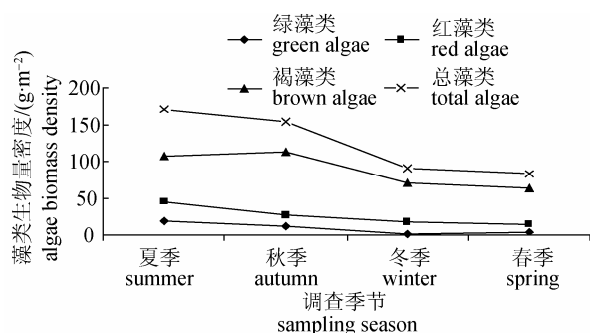


图 2 不同季节不同附着藻类的生物量变化

Fig. 2 Seasonal variation in biomass of different algae

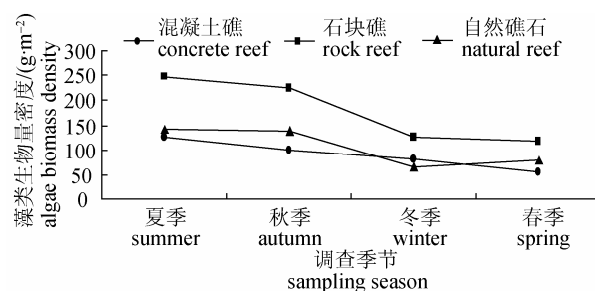


图 3 不同季节 3 种礁体附着藻类的生物量变化

Fig. 3 Seasonal variation in biomass of algal communities attached to three types of reefs

表 2 不同季节 3 种礁体附着藻类的群落参数

Tab. 2 Indices of algal communities attached on three kinds of reefs in different seasons

采样时间 sampling time	礁体类型 reef type	种类数 species number, S	生物量密度/(g·m ⁻²) biomass density, W	种类丰富度 species richness, d	均匀度 evenness, J'	多样性指数 diversity index, H'
2009-08	C	8	145.24	1.4060	0.8613	1.791
2009-08	R	12	246.41	1.9970	0.7687	1.910
2009-08	N	13	146.34	2.4070	0.7361	1.888
2009-11	C	7	98.29	1.3080	0.7688	1.496
2009-11	R	11	225.29	1.8460	0.7849	1.882
2009-11	N	12	138.81	2.230	0.7634	1.897
2010-03	C	4	52.95	0.7558	0.8168	1.132
2010-03	R	8	94.50	1.5390	0.8340	1.734
2010-03	N	6	43.04	1.3290	0.7130	1.278
2010-05	C	4	53.95	0.7522	0.7950	1.102
2010-05	R	11	117.62	2.0980	0.7645	1.833
2010-05	N	11	77.01	2.3020	0.6861	1.645
2010-08	C	8	166.40	1.3690	0.8686	1.806
2010-08	R	13	309.62	2.0920	0.8009	2.054
2010-08	N	13	177.41	2.3170	0.7804	2.002

注: C. 混凝土礁; R. 石块礁; N. 自然礁石。

Note: C. concrete reef; R. rock reef; N. natural reef.

以及裙带菜(*Undaria pinnatifida*)受第 2 轴影响较大, 与营养盐的相关性较高。

对藻类群落和环境因子做 RDA 分析发现, 环境因子中水温是影响藻类群落变化的决定性因子, 其解释了 47.6% 的群落变化。将水温作为唯一环境因子进行 RDA 分析, 结果如图 7 所示。水温对其生物量变化的解释量大于 47% 的藻类有肠浒苔、孔石莼、真江蓠、角叉菜、石花菜(*Gelidium amansii*)以及海带。

分别对 3 种礁体上的藻类群落和主要环境因子指标进行 RDA 分析。结果显示, 影响 3 种礁体上藻类群落变化的第一环境影响因子均为水温, 影响自然礁石上附着藻类群落变化的第二、三影响因子为 N、P 营养盐, 而影响石块礁和混凝土礁上附着藻类

群落变化的第二、三影响因子为 pH 和 DO, 决定各种礁体藻类群落变化的主要环境因子排序及其提供的解释量见表 4。

3 讨论

研究表明, 人工鱼礁投放后, 最初在礁体上附着生长的是石莼等绿藻门藻类, 其次是红藻门和褐藻门藻类, 逐渐由低级藻类向高级大型藻类演替。由于石莼类等藻类会抑制红藻类的生长, 因此从裸石发展到成熟稳定的藻类群落, 一般要经过 2~3 年时间, 褐藻门藻类的大量附着生长即表明人工礁体藻类群落发展成熟^[16]。Choi 等^[17]在 2001 年调查日本四国伊方町附近海域投放的人工礁体时发现, 礁体投放 18 个月后, 礁体上铜藻属等褐藻种类占优势,

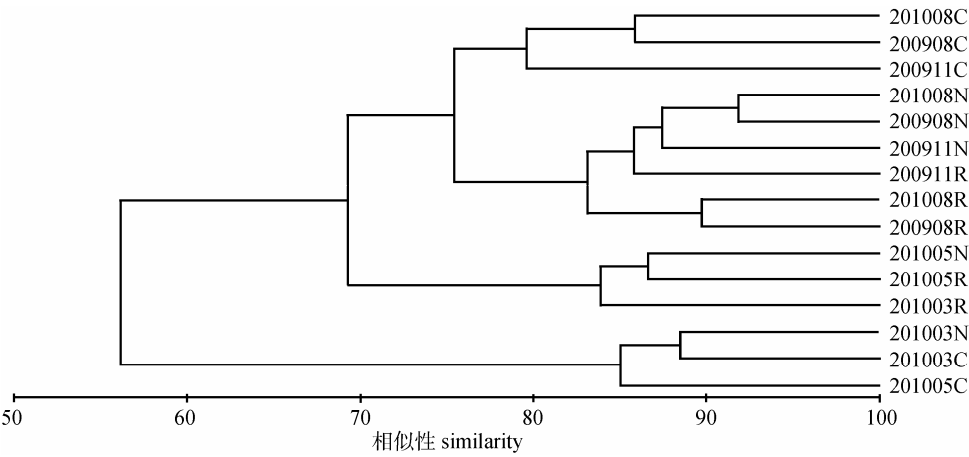


图 4 不同季节 3 种礁体藻类群落的聚类图

图中代号代表采样时间及不同礁体(C.混凝土礁, R. 石块礁, N. 自然礁石).

Fig. 4 The cluster analysis on the algal communities on 3 kinds of reefs in different seasons

Symbols in the figure mean sampling time and type of reefs (C. concrete reef, R. rock reef, N. natural reef).

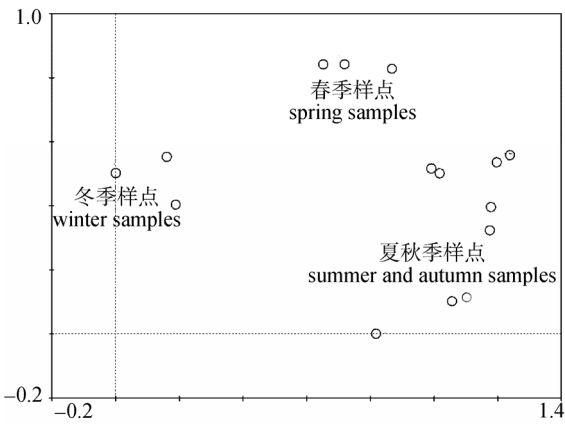


图 5 基于 DCA 分析的藻类样方排序图

Fig. 5 Graph of algal samples from DCA

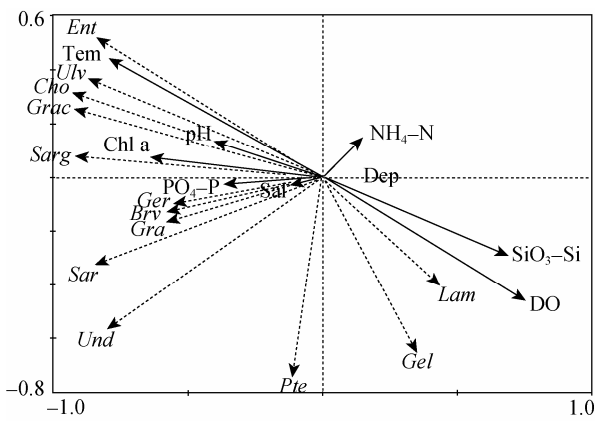


图 6 基于 PCA 分析的藻类物种-环境因子排序图

图中代号所代表藻类名称见表 3.

Fig. 6 Species-environment biplot diagram from the PCA of the algal communities

The corresponding alga names of the abbreviations in the figure are shown in table 3.

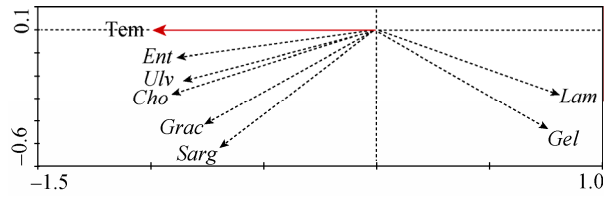


图 7 基于 RDA 分析的藻类群落随水温梯度的变化分布图

图中代号所代表藻类名称见表 3.

Fig. 7 Species-environment biplot from RDA summarizing differences in algal communities along the temperature gradient

The corresponding alga names of the abbreviations in the figure are shown in table 3.

认为礁体上附着的藻类群落趋于成熟。Oyamada 等^[15]于 2001–2006 年间监测了东京湾口海域投放的混凝土块礁和铁渣煤灰混合块礁上藻类群落的演替规律,发现在投放 11 个月后,礁体上藻类群落的优势种由最初的硅藻类逐渐被翅藻属和马尾藻属等褐藻门藻类所代替,演替规律与附近自然礁石上藻类相一致,认为 2 种人工礁体上藻类群落已达到成熟状态。本调查发现,混凝土礁和石块礁 2 种礁体附着藻类中均有褐藻门藻类出现,由此说明投放 3 年后,礁体上附着藻类群落已逐渐趋于成熟。

荣成俚岛湾大部为基岩岬湾海岸,底质以粗砾、中砾为主,水流通畅,藻类生长茂盛。本实验对 3 种不同礁体上大型藻类的 5 次采样调查发现,共有 3 门 13 种底栖藻类出现在调查区域。其中红藻门藻类的种类最丰富,其次是褐藻门藻类。由于褐藻门藻类个体大,其生物量最高;绿藻门藻

表 3 3 种礁体不同季节附着藻类的种类名录
Tab. 3 Algae attached on three kinds of reefs in different seasons

门类 division	中文名称 Chinese name	学名 scientific name	简称 abbreviation
绿藻门 Chlorophyta	肠浒苔	<i>Enteromorpha intestinalis</i>	<i>Ent</i>
	孔石莼	<i>Ulva pertusa kjellm</i>	<i>Ulv</i>
	羽藻	<i>Bryopsis plumosa</i>	<i>Bry</i>
红藻门 Rhodophyta	石花菜	<i>Gelidium amansii</i>	<i>Gel</i>
	鸡毛菜	<i>Pterocladia capillacea</i>	<i>Pte</i>
	三叉仙菜	<i>Ceramium rubrum</i>	<i>Cer</i>
	角叉菜	<i>Chondrus ocellatus</i>	<i>Cho</i>
	繁枝蜈蚣藻	<i>Grateloupia ramosissima</i>	<i>Gra</i>
	真江蓠	<i>Gracilaria asiatica</i>	<i>Grac</i>
褐藻门 Phaeophyta	海黍子	<i>Sargassum muticum</i>	<i>Sarg</i>
	鼠尾藻	<i>Sargassum thunbergii</i>	<i>Sar</i>
	海带	<i>Laminaria japonica</i>	<i>Lam</i>
	裙带菜	<i>Undaria pinnatifida</i>	<i>Uda</i>

表 4 影响 3 种礁体藻类群落变化的重要环境因子排序
Tab. 4 Rank of important variables affecting the algal communities on 3 kinds of reefs

礁体类型 reef type	第一环境影响因子 the first important environmental variable		第二环境影响因子 the second important environmental variable		第三环境影响因子 the third important environmental variable	
	因子名称 variable name	群落变化解释量/% explanation of the variability in the community	因子名称 variable name	群落变化解释量/% explanation of the variability in the community	因子名称 variable name	群落变化解释量/% explanation of the variability in the community
自然礁 natural reef	温度 Tem	73.5	NH ₄ -N	15.9	PO ₃ -P	8.6
混凝土礁 concrete reef	温度 Tem	68.1	pH	11.7	溶解氧 DO	9.5
石块礁 rock reef	温度 Tem	76.6	pH	12.0	溶解氧 DO	7.4

类种类最少,生物量最低,主要由孔石莼和肠浒苔组成。通常,红藻门藻类含有藻红素会反射红光吸收蓝光,使其在较深水域也能进行光合作用而存活,从而成为大型底栖海藻中种类最多、分布最广泛的一类。据报道,黄渤海海域大型底栖海藻共有 103 属 200 种,其中红藻门藻类有 97 种^[18]。Ngan 等^[7]在对澳大利亚汤斯维尔海域潮间带进行藻类调查时,亦发现相同的群落组成规律。本研究海域处于海带养殖区,成熟海带的孢子体脱落,会附着在人工投放的礁体上,从而使海带成为 3 种礁体上生物量密度最高的优势种。石莼属(*Ulva*)和浒苔属(*Enteromorpha*)是中国北方沿海最常见的绿藻类,本调查发现,孔石莼和肠浒苔为礁体附着藻类的优势种,羽藻(*Bryopsis plumosa*)仅为偶见种,这与庄树宏等^[19-20]在山东南长山岛、龙须岛的调查结果一致。刘剑华等^[11]在山东半岛东

部海域的褚岛、日岛、刘公岛、鸡鸣岛、镆钁岛等 8 个岛屿的底栖海藻调查结果也表明,构成底栖藻类群落中的绿藻主要为石莼属和浒苔属的藻类。

本调查发现,藻类生物量及群落多样性指数在夏季较高而冬季较低,但夏季藻类群落均匀度与冬季无显著差异。分析认为,荣成俚岛海域夏季水温适宜,营养盐充沛,藻类种类丰富,但由于褐藻门的海黍子、海带等生物量占绝对优势,致使群落的均匀度较低。随着冬季水温的降低,体型较小的一年生藻类如绿藻门和红藻门中的少数藻类完全衰退,藻类种类数和生物量减少,只有几种冷水性种类生长旺盛,使得冬季藻类群落均匀度也不高。

聚类分析(cluster analysis)表明,在夏、秋季,同种礁体上藻类群落的相似度较高,不同礁体上

附着藻类的群落相似度较低,说明不同附着基对藻类群落结构有显著影响。3种礁体中,石块礁上的藻类群落与自然礁石上的藻类群落相似度高,而与混凝土礁体上的藻类群落差异较大。分析认为,石块礁取自天然,投放水域后对环境扰动较小,更容易融入水域环境,因此其附着藻类的组成与自然礁石的相似度高;混凝土礁为人工制造,其表面结构与石块存在较大差异,材料并非天然,礁体中的一些气体和元素会在投放后释放,使得周边水域理化环境发生改变,因此,其上附着的藻类群落结构变化较大。有研究表明,混凝土礁体投放海域后会释放碱性物质,不利于藻类附着生长^[21]。Oyamada 等^[15]在调查中发现,铁-混凝土混合材料制成的礁体上,藻类的演替速度以及藻类植株长度和湿重都显著高于混凝土礁,其附着效果要好于混凝土礁。Kress 等^[22]发现含有 40%~60% 粉煤灰的礁体上,藻类附着效果要显著好于纯混凝土和纯粉煤灰礁体。此外,本实验中混凝土礁体为 A 字形人工礁,其形状也可能对藻类的附着产生影响,需进一步进行试验验证。

DCA 分析表明,藻类样方点在排序轴上的分布沿第一、二轴均有明显的梯度变化,冬季的藻类样方点分布于排序图第一轴的左端,而夏、秋季的样方点则分布于第一轴的右端。因此认为,水温的变化决定了藻类的群落结构,随着水温的升高,一些冷水性藻类被暖水性藻类替代。从第二轴的样方点分布位置上看,夏、秋季节混凝土礁藻类样方点分布于第二轴的下端,而春、冬季的石块礁以及春季的自然礁藻类样方点分布于第二轴的上端,且规律不明显,分析认为是几种生态因子共同作用的结果。

聚类分析是根据藻类样方中物种的生物量密度组成,两两比较,计算其相似度,然后按相似度高,以树状图的形式体现各样方在种类生物量组成上的相似关系。而 DCA 分析则是在对应分析的基础上,为了消除排序图上的“弓形效应”(样方在第二排序轴上的分布位置很大程度上依赖于其在第一轴的分布,这是对应分析中正交化的必然结果^[23])而做的对应分析,作为一种非限制性梯度分析方法,可以初步探讨影响藻类群落特征

的内在因子。研究表明,基于 DCA 分析的样方排序图可以反映样方的相似关系,桂东伟等^[24]在研究中昆仑山北坡策勒河流域生态因素对植物群落的影响时,通过对比 TWINSpan 聚类图和 DCA 排序图,认为 DCA 分析可以有效反映植物样方的相似关系,并且能够较形象地解释植物群落与环境因子的对应关系。本研究的 PRIMER 聚类分析与 DCA 排序图结果基本吻合,一方面验证了聚类分析结果的合理性,同时各样方在 DCA 二维排序图上有明显的分布范围和界限,较聚类分析更能形象地反应藻类群落与环境因子之间的内在规律。

生物群落变化与环境因子的梯度响应模型主要有 2 种,线性模型和单峰模型,这 2 种模型都是对实际数据的近似拟和,在比较短的梯度下,线性模拟准确度更高,判断依据是根据 DCA 4 个排序轴长度,当最长排序轴长度 >4 时,适用单峰模型,当 <4 时适用线性模型。在线性模型中,RDA 分析是在线性模型基础上的一种约束性排序方法,可以研究环境因子中单个因子或者几个因子组合对生物群落变化的影响程度,通过 RDA 排序结果显示,水温是影响藻类群落的决定性因子。温度是植物生长最重要的影响因素之一,任何植物的生长、发育都需要一定的热量和温度范围,超过或者低于适宜温度时,植物生长就会受到抑制。本实验海区属于温带季风区,四季温度变化明显,夏季水温高(21°C 以上)而冬季水温低(短期可达 4°C 以下),水温的差异决定了两个季节藻类群落结构的不同。根据 RDA 分析的物种随水温变化图可知,绿藻门藻类以及红藻门的石花菜、江蓠和角叉菜以及褐藻门的海带和海黍子受水温的影响较大,其余藻类受其影响不大,分析原因有:(1)一些偶见种如羽藻、三叉仙菜等由于生物量极低且为零星出现,因此趋势不明显;(2)海带是典型的冷温性藻类,冬季生物量高于夏、秋季,其他褐藻门中的大型藻类虽冬季也衰败,但其残余部分依旧附着,且生物量相对较高,表现在梯度分析中与水温相关性不大;(3)夏秋季节水温适宜,同时,海带收获活动使海区水层交换充分,海黍子等暖温性藻类生长旺盛,因此造成夏、秋季藻类生物量大。由于冷温性藻类种类较少,使得冬、春季藻类生物量相对较低。通过 RDA 分析 3 种礁体藻

类群落变化的影响因子发现,除水温外,N、P 营养盐是制约自然礁石区藻类群落的第二、三环境影响因子,而在人工礁体区,N、P 营养盐的影响不再显著,分析认为人工礁体所营造的涌升流和背涡流使得海水上下层交换充分,营养盐丰富,使得 N、P 不再成为限制藻类群落的主要因子。此时,pH 和溶解氧成为人工礁区限制藻类群落的二、三环境影响因子,人工礁投放后会对海底的 pH 和溶解氧影响较大,一方面,混凝土礁体会释放碱性物质;另一方面,随着礁区生态系统日益复杂,溶解氧含量变化较大,对藻类群落结构会产生较大影响。

本研究结果表明,石块礁藻类群落不仅与自然礁藻类群落相似性较高,而且附着藻类生物量最大,是该海区营建人工藻场较好的礁体材料。混凝土作为国内外人工礁体选用最多的材料,其材料组成及制作工艺会对其生物附着效果产生一定影响,但不可否认其在诱集生物等方面的生态学作用,而且混凝土制礁的结构稳定性高,随着时间推移,其生态养护效果将会逐渐显现。

参考文献:

- [1] 李美真,詹冬梅,丁刚,等.人工藻场的生态作用、研究现状及可行性分析[J].渔业现代化,2007(1):20-22.
- [2] 于沛民.人工藻礁选型与藻类附着效果的初步研究[D].青岛中国海洋大学,2007.
- [3] Bombace G. Protection of biological habitats by artificial reefs[C]//Jensen A C. European artificial reef research. Proceedings of the 1st EARRN conference, Ancona, Italy, March 1996. Southampton (UK): Southampton Oceanography Centre Publ Inc, 1997: 1-15.
- [4] Mottet M G. Enhancement of the marine environment for fisheries and aquaculture in Japan[C]//D'Itri F M. Artificial Reefs: Marine and feshwater applications, UK: Lewis Publ. Inc, 1985: 13-112.
- [5] Ancora S, Bianchi N, Butini A, et al. Posidonia oceanica as a biomonitor of trace elements in the Gulf of Naples: temporal trends by lepidochronology[J]. Environ Toxicol Chem, 2004, 23(5): 1093-1099.
- [6] Davey A. Studies on Australian mangrove algae. III. Victorian communities: Structure and recolonization in western port bay[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1985, 85(2): 177-190.
- [7] Ngan Y, Price I R. Distribution of intertidal benthic algae in the vicinity of Townsville, tropical Australia[J]. Aust J Mar Freshw Res, 1980, 31(2): 175-191.
- [8] Gunnarsson K, Ingolfsson A. Seasonal changes in the abundance of intertidal algae in southwestern Iceland[J]. Bot Mar, 1995, 38(1-6): 69-78.
- [9] 谢恩义,申玉春,叶宁,等.流沙湾的底栖大型海藻调查[J].广东海洋大学学报,2009,29(4):30-35.
- [10] 杨震,王悠,董开升,等.青岛潮间带大型底栖海藻群落的研究[J].中国海洋大学学报,2009,39(4):647-651.
- [11] 刘剑华,张耀红.山东半岛东部海域诸岛潮间带底栖海藻的研究[J].青岛海洋大学学报,1994,24(3):384-392.
- [12] 王志铮,张义浩,吴常文,等.中街山列岛底栖海藻的资源调查[J].水产学报,2002,26(2):189-192.
- [13] 张义浩,李文顺.浙江沿海大型底栖海藻分布区域与资源特征研究[J].渔业经济研究,2008,(2):8-14.
- [14] 王洪勇,吴洪流,姚雪梅,等.海南岛常见的大型底栖海藻[J].热带生物学报,2010,1(2):175-182.
- [15] Oyamada K, Tsukidate M, Watanabe K. A field test of porous carbonated blocks used as artificial reef in seaweed bes of *Ecklonia cava*[J]. J Appl Phycol, 2008, 20(5): 863-868.
- [16] Sousa W P. Experimental investigations of disturbance and ecological succession in a rocky intertidal algal community[J]. Ecol Monogr, 1979, 49(3): 227-254.
- [17] Choi C G, Takeuchi Y, Teeawaki T, et al. Ecology of seaweed beds on two types of artificial reef[J]. J Appl Phycol, 2002, 14(5): 343-349.
- [18] 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.
- [19] 庄树宏,陈礼学,孙力.龙须岛浪蚀花岗岩潮间带大型底栖藻类群落的季节变化模式[J].海洋科学,2004,28(8):47-54.
- [20] 庄树宏,陈礼学,孙力.南长山岛沿岸潮间带底栖藻类群落结构的季节变化格局[J].海洋科学进展,2003,21(2):194-202.
- [21] Davis N, Vanblaricom G R, Dayton P K. Man-made structures on marine sediments: effects on adjacent benthic communities[J]. Mar Biol, 1982, 70(3): 295-303.
- [22] Kress N, Tom M, Spanier E. The use of coal fly ash in concrete for marine artificial reefs in the southeastern Mediterranean: compressive strength, sessile biota, and chemical composition[J]. J Mar Sci, 2002, 59(5): 231-237.
- [23] Hugh G, Gauch J R. Multivariate analysis in community ecology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- [24] 桂东伟,雷加强,曾凡江,等.中昆仑山北坡策勒河流域生态因素对植物群落的影响[J].草业学报,2010,19(3):38-46.

Effect of environment on benthic macro-algal communities of artificial reefs in Lidao, Rongcheng

ZHANG Lei, ZHANG Xiumei, WU Zhongxin, ZHANG Peidong

College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract: We evaluated the relationship between environmental indices and succession in the algal communities of artificial reefs near Lidao, Rongcheng. We documented species diversity and biomass on a quarterly basis between August 2009 and August 2010, about 3 years after the reefs were installed. We documented thirteen algal species belonging to three divisions. Of these, six species belonging to Rhodophyta dominated the flora numerically. Conversely, Phaeophyta had the highest biomass density (92.724 g/m²). The algal community had reached maturity after three years of development. The number of species and biomass were higher in summer and autumn than in spring and winter. Both cluster analysis and detrending correspondence analysis revealed 83.1% similarity between algal communities in rock reefs and natural reefs. Both the biomass and diversity index were higher in algal communities in rock and natural reefs than in concrete reefs. PCA and DCA analysis suggested that temperature was the major environmental factor affecting the algal communities, explaining 47.6% of the variation. Nitrogen and phosphorus constituted secondary factors in the natural reef area whereas pH and dissolved oxygen (DO) levels were secondary in artificial reef areas.

Key words: benthic macro-algal community; artificial reef; DCA; PCA; RDA

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