

硃洲岛大型海藻群落季节演替*

张才学, 周伟男, 孙省利, 宋之光

广东海洋大学海洋资源与环境监测中心, 广东 湛江 524088

摘要: 2011 年 4 月至 2012 年 1 月对硃洲岛潮间带大型海藻进行了周年的季节调查, 结果表明, 调查海域大型海藻共有 64 种。其中褐藻门 15 种, 占总种类数的 23.44%; 红藻门 28 种, 占总种类数的 43.75%; 绿藻门 20 种, 占总种类数的 31.25%; 蓝藻门 1 种, 占总种类数的 1.56%。其种类数春季最多, 共 43 种; 夏季 24 种; 秋季 29 种; 冬季 31 种。有 9 个物种为 4 个季节共有种, 有 14 个物种为 3 个季节共有种。各季节间共有种类数为 12~26 种, 季节间种类更替率为 0.42~0.78, 春夏季种类更替率最高, 秋冬季种类更替率最低。优势种共有 13 种, 仅拟鸡毛菜 *Pterocladia capillacea* 为全年优势种, 而半叶马尾藻 *Sargassum hemiphyllum* 和小珊瑚藻 *Corallina pilulifera* 为 3 个季节共有优势种。调查海域大型海藻生物量季节变化明显, 平均生物量春季最高, 冬季次之, 夏季最低。不同物种其垂直分带明显, 从高潮区往低潮区种类数不断增多; 生物量也是从高潮区往低潮区逐渐增大。物种多样性指数变化范围为 0.03~2.33, 年均值为 1.10; 均匀度变化范围为 0.01~0.70, 年均值为 0.36; 种类丰富度指数变化范围为 0.15~1.65, 年均值为 0.72; 辛普森优势度指数变化范围为 0.01~0.78, 年均值为 0.39。各大型海藻含水率变化范围在 51.92%~97.52%, 平均值为 85.21%; 总有机碳含量变化范围在 4.34%~42.06%, 平均为 27.99%。相关性分析发现, 调查海域大型海藻生物量与无机氮(DIN)呈显著负相关, 相关系数为 0.49($P < 0.05$), 与其他环境因子的相关性不明显。在大型海藻生长旺盛的冬春季, 海水中的无机氮(DIN)含量最低, 与其他自然海域冬季营养盐积累规律显著不同。

关键词: 大型海藻; 群落特征; 季节演替; 相关性分析; 潮间带; 硃洲岛

中图分类号: Q958.1; P735

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2020)01-0074-11

Seasonal succession of macroalgae community in Naozhou Island

ZHANG Caixue, ZHOU Weinan, SUN Xingli, SONG Zhiguang

Monitoring Center of Ocean Resource and Environment, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

Abstract: Seasonal investigation of intertidal zones of Naozhou Island was conducted from April 2011 to January 2012. The results show that there were 64 species of macroalgae in this Sargasso field, including 15 species of Phaeophyta, 28 species of Rhodophyta, 20 species of Chlorophyta and one species of Cyanophyta, accounting for 23.44%, 43.75%, 31.25% and 1.56% of the total species, respectively. Among the 64 species, 43 species were thriving in spring, 24 species were emerging in summer, 29 species were active in autumn and 31 in winter. Only nine species were thriving throughout the whole year, including six species of Rhodophyta, two species of Chlorophyta and one species Phaeophyta, while there were 14 species living through three seasons. There were about 12–26 common species that can be found between two seasons and the species turnover rate was from 0.42 to 0.78, associated with higher turnover rates in spring and summer and lower rates in autumn and winter. Moreover, there were 13 dominant species but only *Pterocladia capillacea* was the all-year dominant species, while *Sargassum hemiphyllum* and *Corallina pilulifera* were the dominant species over three seasons. Average biomass vary greatly

收稿日期: 2019-03-09; 修订日期: 2019-08-06。孙淑杰编辑

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201105008-5、201505027)

作者简介: 张才学(1963—), 广东省阳春市人, 副教授, 从事海洋生态和海洋环境的教研工作。E-mail: gdzhangcx@126.com

*国家海洋局第三海洋研究所有关专家对底栖生物标本鉴定给予帮助, 在此特表谢意。

Received date: 2019-03-09; Revised date: 2019-08-06. Editor: SUN Shujie

Foundation item: China Marine Special Nonprofit Scientific Research (201105008-5, 201505027)

Corresponding author: ZHANG Caixue. E-mail: gdzhangcx@126.com

with season, with the order of spring ($848.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) > winter ($378.57 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) > autumn ($297.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) > summer ($294.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). There is clearly vertical variation in the species distribution as the species number increases significantly from high tidal zone to low tidal zone, while the biomass show similar changing trend, indicating both species and biomass increase with water depth in the tidal zone. The Shannon-Weinner index was from 0.03 to 2.33, with an annual average of 1.10, while the Pielou's index was from 0.01 to 0.70, with an annual average of 0.36; the Margalef index varied from 0.15 to 1.65, with an annual average of 0.72; and the Simpson's dominance index varied from 0.01 to 0.78, with an annual average of 0.39. The total water content of seaweeds changes ranged from 51.42% to 97.52%, with an average moisture of 85.21%. The total organic carbon content of seaweeds varied from 4.34% to 42.06%, with an average of 27.99%, indicating a strong carbon storage capacity. We find a clear negative correlation between the biomass of large seaweeds and dissolved inorganic nitrogen (DIN), with a coefficient of 0.49 ($P < 0.05$). The lower DIN of seawater during spring and winter is coincided with microalgae thriving seasons.

Key words: macroalgae; community characteristic; seasonal succession; relevance analysis; intertidal zone; Naozhou Island

硃洲岛是一个大约 20 ~ 50 万年前由海底火山喷发形成的海岛, 位于湛江市东南约 40km 处, 全岛陆地面积 56 km^2 , 海岸线长 43.98km, 东部海岸由于受海浪冲蚀, 岛基均由黑云母花岗岩的基岩构成(陈苑, 2011)。据当地渔民介绍, 20 世纪 80 年代前, 在硃洲岛东部海岸中低潮区的基岩上生长着各种大型海藻, 尤以马尾藻 *Sargassum*、羊栖菜 *Hizikia fusiforme* 和石莼 *Ulva lactuca* 等居多, 在春季大潮退潮时, 大面积的马尾藻在海浪的簇拥下左右摇摆, 形成壮观的天然马尾藻场, 当时海水清澈, 水质清新, 鱼虾蟹成群, 是众多海洋生物的乐园(胡兴, 1997; 肖汉洪 等, 2003; 罗余方, 2017)。近 30 年来, 随着工农业和海水养殖业的发展, 近岸海域海水污染日趋严重, 硃洲岛繁茂的马尾藻已严重衰退, 尤其是本地特色的硃洲马尾藻、全缘马尾藻和半叶马尾藻等大型海藻分布区域急剧萎缩, 其生态系统已遭受到严重破坏, 对该海域大型海藻场生态环境开展系统调查, 评估藻场生态环境现状和藻场退化原因, 是该海域藻场修复和重建的迫切需要。有关海藻场大型海藻群落演替研究著述不多, 本文仅对硃洲岛马尾藻场岩礁区大型海藻群落开展研究, 其成果可为硃洲岛海岸带的开发与管理、藻场生态系统的修复、筑牢海洋生态安全屏障、保护海洋生物资源的可持续利用提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与分析

于 2011 年 4 月至 2012 年 1 月在硃洲岛岩礁区及博贺兰岛礁共布设了 5 条采样断面, 其经纬度分别为: R1 ($20^{\circ}52'14.59''\text{N}$, $110^{\circ}36'25.86''\text{E}$)、R2 ($20^{\circ}53'26.5''\text{N}$, $110^{\circ}36'37.66''\text{E}$)、R3 ($20^{\circ}55'17.1''\text{N}$, $110^{\circ}38'03.9''\text{E}$)、R4 ($20^{\circ}56'0.04''\text{N}$, $110^{\circ}38'16.36''\text{E}$)、R5 ($20^{\circ}50'10.51''\text{N}$,

$110^{\circ}37'08.71''\text{E}$)(图 1)。每条断面共设置了 6 个采样站: 高潮区 1 个, 中潮区 3 个(中上、中中、中下), 低潮区 2 个(低上、低下)。分别于春(4 月)、夏(7 月)、秋(10 月)、冬(1 月)大潮时进行大型海藻样品采集。在宏观观察基础上, 分别在每个站位选取 2 个 $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 的能代表该站位生物分布特点的取样样方采取定量样品。取样时, 用刮刀刮取样方内所有大型海藻样品作为定量样品。在每个断面不同潮区采集所有海藻物种作为定性样品。定量样品去除沙和杂物, 用过滤海水洗净晾干后于天平上称重; 定性样品按潮区、大小分类分种压制成腊叶标本或液浸标本, 在实验室内镜检和分类。

潮间带水质样品是在大潮退潮时分别在每个断面低潮区水深 1m 处用 5L 塑料罐采集; 叶绿素 a 样品为用 1L 塑料瓶采集表层水样, 加入 5mL 浓度为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MgCO_3 悬浮液保存。水温、盐度和 pH 值分别采用温度计(精度 0.1)、Orion130A 盐度计(精度 0.01)和 pH 计(Orion star A221 型, 精度 0.01)现场测定。

NO_2^- 的测定采用盐酸萘乙二胺分光光度法, NH_4^+ 的测定采用次溴酸盐氧化法, NO_3^- 的测定采用锌-镉还原法, PO_4^{3-} 的测定采用磷钒钼黄分光光度法, SiO_3^{2-} 的测定采用硅钼黄法, 叶绿素 a 采用(9+1)丙酮萃取分光光度法测定(国家海洋环境监测中心, 2007)。

大型海藻碳含量的分析方法: 取定性海藻样品用过滤海水洗净晾干后于天平上称取湿重, 然后进行冷冻干燥至恒重, 称取干重, 计算含水率; 把经冷冻干燥后的海藻样品研磨至 100 目, 于总有机碳分析仪(型号: TOC-VCSH)分别进行 TC(总碳)和 IC(无机碳)测定, 两者之差即为 TOC(总有机碳)。

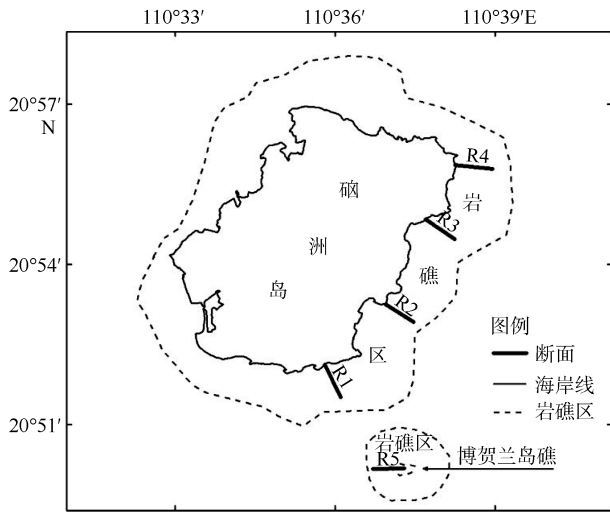


图1 硇洲岛岩礁区大型海藻的采样断面

Fig. 1 Sampling sections of macroalgae in the rocky zone of Naozhou Island

1.2 统计方法

种类更替率 $R = (a+b-2c) \cdot (a+b-c)^{-1}$, a 、 b 为两不同季节种类数, c 为两不同季节共有种类数(种类更替率是两季节不同种类数与两季节总种类数之比, 其值在 0~1 之间, 数值越大, 群落更替越明显, 数值为 0 时, 两季节种类完全相同, 数值为 1 时, 两季节没有共有种)。

多样性指数 $H' = -\sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$, 式中 S 为物种数, p_i 为第 i 种在全部采样中的比例($p_i = n_i \cdot N^{-1}$), n_i 为第 i 种的生物量, N 为所有种的总生物量。

均匀度 $J = H' \cdot (\log_2 S)^{-1}$, 式中 H' 为多样性指数值, S 为样品中总种类数。

优势度 $Y = (n_i \cdot N^{-1}) \times f_i$, 式中 n_i 为第 i 种的总生物量; N 为所有物种的总生物量, f_i 为第 i 种在各站出现的频率, 以 $Y > 0.02$ 作为优势种。

种丰富度指数 $d = (S-1) \cdot (\log_2 N)^{-1}$, 式中 N 为样品中所有种类的总生物量, S 为样品中的总种数。

辛普森优势度指数 $1 - \lambda' = 1 - \frac{\sum N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)}$, N_i 为样品中第 i 种的生物量, N 为样品的总生物量。

相关性分析采用 SPSS 软件完成。

总无机氮(DIN)为 NH_4^+ 、 NO_2^- 和 NO_3^- 三者之和。

2 结果

2.1 岩礁区大型海藻的种类组成

经鉴定, 调查海域潮间带大型海藻共有 64 种。

其中褐藻门 15 种, 占总种类数的 23.44%; 红藻门 28 种, 占总种类数的 43.75%; 绿藻门 20 种, 占总种类数的 31.25%; 蓝藻门 1 种, 占总种类数的 1.56%。

褐藻门 PHAEOPHYTA 的种类为: 囊藻 *Colpomenia sinuosa*、脆弱网地藻 *Dictyota friabilis*、鹅肠菜 *Endarachne binghamiae*、羊栖菜 *Hizikia fusiforme*、叶状铁钉菜 *Ishige sinicola*、南方团扇藻 *Padina australis*、波利团扇藻 *Padina boryana*、团扇藻 *Padina* sp.、灰叶马尾藻 *Sargassum cinereum*、丛缘叶马尾藻 *S. duplicatum*、灌木马尾藻 *S. fruticosum*、半叶马尾藻 *S. hemiphyllum*、亨氏马尾藻 *S. henslowianum*、全缘马尾藻 *S. integerrimum*、硇洲马尾藻 *S. naozhouense*。

红藻门 RHODOPHYTA 的种类为: 穗状鱼栖菜 *Acanthophora spicifera*、平滑叉节藻 *Amphiroa ephedraea*、美丽叉节藻 *A. beauvoisii*、叉节藻 *Amphiroa* sp.、紫杉状海门冬 *Asparagopsis taxiformis*、旋体藻 *Audouinella* sp.、茎刺藻 *Caulacanthus ustulatus*、纵胞藻 *Centroceras clavulatum*、中间软刺藻 *Chondracanthus intermedius*、粗枝软骨藻 *Chondria dasyphylla*、小珊瑚藻 *Corallina pilulifera*、珊瑚藻 *Corallina* sp.、乳节藻 *Galaxaura oblongata*、钝乳节藻 *Galaxaura obtusata*、太平洋乳节藻 *Galaxaura pacifica*、乳节藻 *Galaxaura* sp.、小石花菜 *Gelidium divaricatum*、小杉藻 *Gigartina intermedia*、海萝 *Gloiopeltis furcata*、繁枝蜈蚣藻 *Grateloupia ramosissima*、舌状蜈蚣藻 *Grateloupia livida*、扇形拟伊藻 *Gymnogongrus flabelliformis*、冻沙菜 *Hypnea japonica*、叉珊瑚藻 *Jania* sp.、新角石藻 *Neogoniolithon* sp.、海头红 *Plocamium telfairiae*、多管藻 *Polysiphonia* sp.、拟鸡毛菜 *Pterocladia capillacea*。

绿藻门 CHLOROPHYTA 的种类为: 哈维羽藻 *Bryopsis harveyana*、羽藻 *B. plumosa*、盾叶蕨藻 *Caulerpa peltata*、杉叶蕨藻 *C. taxifolia*、气生硬毛藻 *Chaetomorpha aerea*、中间硬毛藻 *Ch. media*、簇生刚毛藻 *Cladophoropsis fasciculatus*、斯氏刚毛藻 *Cladophora stimpsonii*、网球藻 *Dictyosphaeria cavernosa*、条浒苔 *Enteromorpha clathrata*、肠浒苔 *E. intestinalis*、缘管浒苔 *E. linza*、错纵根枝藻 *Rhizoclonium implexum*、花石莼 *Ulva conglobata*、裂片石莼 *U. fasciata*、石莼 *U. lactuca*、孔石莼 *U. pertusa*、法囊藻 *Valonia*

aegagropila、囊状法囊藻 *Valonia utricularis*、指枝藻 *Valoniopsis pachynema*。

蓝藻门 CYANOPHYTA 的种类为: 半丰满鞘颤藻 *Lyngbya semiplena*。

调查海域大型海藻种类数存在着季节变化: 春季最多, 达 43 种; 夏季 24 种; 秋季 29 种; 冬季 31

种。4 个季节共有种类有 9 种, 其中红藻门 6 种, 绿藻门 2 种, 褐藻门 1 种; 3 个季节共有种类有 14 种。各季节间共有种类数为 12~26 种, 种类更替率为 0.42~0.78(表 1)。春、夏季种类更替率最高, 秋、冬季种类更替率最低。从种类更替率分析, 春季和夏季间群落结构差异较大, 季节更替较明显。

表 1 硃洲岛岩礁区大型海藻季节间种类更替率
Tab. 1 Species subrogation ratio of macroalgae between two seasons in the rocky zone of Naozhou Island

项目	春/夏	春/秋	春/冬	夏/秋	夏/冬	秋/冬
各季节种数	43/24	43/29	43/31	24/29	24/31	29/31
共有种数	12	20	26	13	13	22
种类更替率 <i>R</i>	0.78	0.62	0.46	0.68	0.69	0.42

2.2 大型海藻生物量的分布和季节变化

2.2.1 大型海藻生物量的平面分布和季节变化

调查海域大型海藻的平面分布与人类干扰密切相关。远离陆域的博贺兰礁区(R5 断面)受人类活动干扰较少, 其生物量年平均值最高; 受人类活动干扰较大的 R1 断面, 其生物量年平均值最低; 各调查断面大型海藻生物量的年平均值依次为 R5(776.01g·m⁻²)>R4(506.53g·m⁻²)>R2(438.90g·m⁻²)>R3(422.92g·m⁻²)>R1(129.20g·m⁻²)。大型海藻各种类生态特性不同, 其分布具有明显的季节变化特征, 喜低温的种类在冬季生长旺盛, 而喜高温的种类在夏季出现。平均生物量是春季最高, 达 848.14g·m⁻²; 冬季次之, 为 378.57g·m⁻²; 秋季为 297.99g·m⁻²; 而夏季最低, 仅为 294.15g·m⁻²(图 2)。

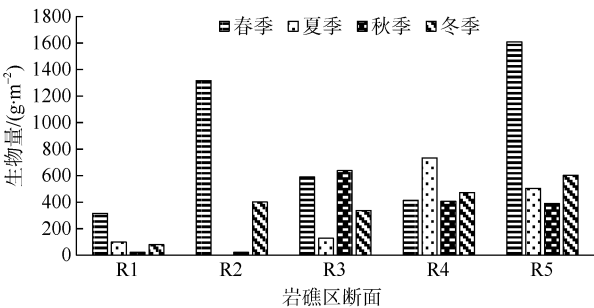


图 2 调查海域大型海藻生物量的平面分布和季节变化
Fig. 2 Horizontal distribution and seasonal change of macroalgae biomass in the study area

2.2.2 大型海藻生物量的垂直分布和季节变化

在垂直分布上, 大型海藻具有明显的垂直分布特征。其种类数高潮区 1 种, 中上区 8 种, 中中区 10 种, 中下区 16 种, 低上区 22 种, 低下区 32 种; 生物量年平均值依次为低下区(1009.82g·m⁻²)>低上区

(827.45g·m⁻²)>中下区(284.84g·m⁻²)>中中区(93.41g·m⁻²)>中上区(51.15g·m⁻²)>高潮区(0g·m⁻²)。大型海藻的垂直分布也存在着季节变化: 春季最为明显, 低潮区生物量最大, 到了中潮区则显著减少, 其生物量垂直方向的变化为从低往高逐渐减少; 夏季则有所不同, 低下区生物量最高, 中下区次之, 而低上区位居第三, 中上区则大为减少; 秋季的垂直分布又不同, 生物量是低上区最高, 低下区次之, 中潮区以上大为减少; 冬季生物量的垂直变化趋势较为平缓, 从低往高逐渐减少(图 3)。

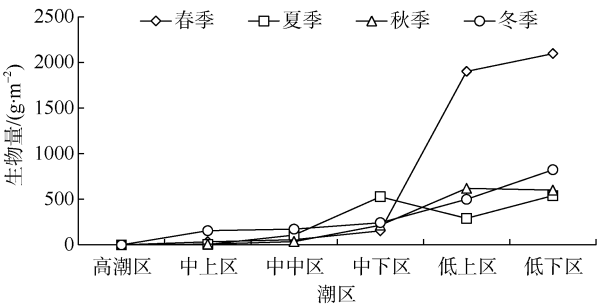


图 3 各季节大型海藻生物量的垂直分布和季节变化
Fig. 3 Vertical distribution and seasonal variation of macroalgae biomass in each season

2.3 优势种群及季节演替

以物种生物量为统计参数, 对硃洲岛岩礁区大型海藻进行优势度分析, 结果表明, 调查海域大型海藻优势种共有 13 种: 半叶马尾藻 *S. hemiphyllum*、拟鸡毛藻 *P. capillacea*、囊藻 *C. sinuosa*、紫杉状海门冬 *A. taxiformis*、茎刺藻 *C. ustulatus*、中间软刺藻 *C. intermedius*、纵胞藻 *C. clavulatum*、斯氏刚毛藻 *C. stimpsonii*、小珊瑚藻 *C. pilulifera*、新角石藻 *Neogoniolithon* sp.、叉珊瑚藻 *Jania* sp.、杉叶蕨藻 *C.*

taxifolia、法囊藻 *V. aegagropila*, 其中拟鸡毛菜为全年优势种, 半叶马尾藻和小珊瑚藻为三季优势种。优势群落由春季的半叶马尾藻和拟鸡毛菜演替为夏季的茎刺藻、中间软刺藻、纵胞藻、斯氏刚毛藻、新

角石藻、叉珊藻和拟鸡毛菜, 再演替为秋季的拟鸡毛菜、半叶马尾藻、中间软刺藻和法囊藻, 最后演替为冬季的拟鸡毛菜、半叶马尾藻、小珊瑚藻和纵胞藻(表 2)。

表 2 调查海域各季节大型海藻的优势种群

Tab. 2 Dominant species of macroalgae in each season in the study area

季节	优势种	平均生物量/(g·m ⁻²)	生物量百分比/%	出现频度	优势度
春季	<i>Sargassum hemiphyllum</i>	540.08	63.68	1.00	0.64
	<i>Pterocladia capillacea</i>	128.64	15.17	1.00	0.15
	<i>Colpomenia sinuosa</i>	76.33	9.00	0.80	0.07
	<i>Asparagopsis taxiformis</i>	40.94	4.83	0.60	0.03
夏季	<i>Caulacanthus ustulatus</i>	49.40	16.79	0.80	0.13
	<i>Chondracanthus intermedius</i>	46.08	15.67	0.40	0.06
	<i>Centroceras clavulatum</i>	35.07	11.92	0.40	0.05
	<i>Neogoniolithon</i> sp.	31.20	10.61	0.40	0.04
	<i>Jania</i> sp.	26.75	9.10	0.40	0.04
	<i>Cladophora stimpsonii</i>	20.84	7.09	1.00	0.07
	<i>Pterocladia capillacea</i>	17.36	5.90	1.00	0.06
	<i>Corallina pilulifera</i> f. <i>sororia</i>	17.15	5.83	0.40	0.02
	<i>Caulerpa taxifolia</i>	16.06	5.46	0.80	0.04
秋季	<i>Pterocladia capillacea</i>	113.19	38.24	0.80	0.31
	<i>Sargassum hemiphyllum</i>	55.29	18.68	0.60	0.11
	<i>Chondracanthus intermedius</i>	33.92	11.46	0.40	0.05
	<i>Valonia aegagropila</i>	29.57	9.99	0.60	0.06
	<i>Corallina pilulifera</i> f. <i>sororia</i>	11.45	3.87	1.00	0.04
冬季	<i>Pterocladia capillacea</i>	175.81	40.08	0.80	0.32
	<i>Sargassum hemiphyllum</i>	109.51	24.96	0.60	0.15
	<i>Corallina pilulifera</i> f. <i>sororia</i>	47.86	10.91	1.00	0.11
	<i>Centroceras clavulatum</i>	46.60	10.62	0.60	0.06

2.4 大型海藻的物种多样性

以物种生物量为统计参数, 对硃洲岛潮间带大型海藻的多样性参数进行分析, 结果表明, 多样性指数变化范围在 0.03~2.33, 年平均为 1.10, 夏季最高, 秋季最低; 均匀度变化范围为 0.01~0.70, 年平均为 0.36, 也是夏季最高, 秋季最低; 种丰富度指数变化范围为 0.15~1.65, 年平均为 0.72, 春季最高, 秋季最低; 辛普森优势度指数变化范围为 0.01~0.78, 年平均为 0.39, 夏季最高, 秋季最低(表 3)。

2.5 各大型海藻的碳含量

采用冷冻干燥法对各主要大型海藻的含水率和碳含量进行分析。各大型海藻的含水率变化范围在 51.92%~97.52%, 平均为 85.21%, 含水率最高的是繁枝蜈蚣藻 *G. ramosissima*, 含水率最低的是指状藻

V. pachynema; 各大型海藻干重的总有机碳含量变化范围在 4.34%~42.06%, 平均为 27.99%, 总有机碳含量最高为珊瑚藻 *Corallina* sp., 最低的是指状藻(表 4)。

3 讨论

3.1 硃洲岛岩礁区大型海藻群落特征

海洋基底直接影响着海洋生物对环境的自然选择。基岩质底的硃洲岛马尾藻场的显著特征, 为拥有大量营固着和附着生活的底栖生物, 基岩质底为营附着生活的大型海藻提供了良好的生存环境(Steneck et al, 2002; 章守宇 等, 2007; Liu, 2013)。本次调查共鉴定大型底栖生物 406 种, 其大型海藻的种类数和生物量极大地超过了其他底质(李荣冠 等, 1993; 赖廷和 等, 2019)。

表 3 硃洲岛岩礁区大型海藻的多样性参数
Tab. 3 Diversity parameters of marcoalgae in the rocky zone of Naozhou Island

多样性指数		断 面					平均
		R1	R2	R3	R4	R5	
春季	H'	0.03	1.29	1.45	1.32	1.19	1.06
	J	0.02	0.43	0.34	0.35	0.37	0.30
	d	0.38	0.47	1.65	1.18	1.62	1.06
	$1-\lambda'$	0.01	0.51	0.58	0.50	0.31	0.38
夏季	H'	1.51	0.05	1.58	2.33	2.21	1.54
	J	0.65	0.02	0.68	0.70	0.62	0.53
	d	0.45	0.64	0.43	0.76	0.97	0.65
	$1-\lambda'$	0.62	0.01	0.62	0.78	0.73	0.55
秋季 Autumn	H'	0.28	0.01	0.77	1.78	1.27	0.82
	J	0.14	0.01	0.33	0.56	0.40	0.29
	d	0.44	0.15	0.34	0.73	0.73	0.48
	$1-\lambda'$	0.07	0.01	0.27	0.66	0.47	0.30
冬季	H'	0.43	0.75	0.72	1.95	1.09	0.99
	J	0.17	0.37	0.21	0.61	0.30	0.33
	d	0.58	0.27	0.93	0.71	0.95	0.69
	$1-\lambda'$	0.16	0.29	0.19	0.67	0.34	0.33

表 4 硃洲岛主要大型海藻的碳含量(干重)
Tab. 4 Carbon contents of major marcoalgae (dry weight) in Naozhou Island

种类	含水率/%	TC/%	IC/%	TOC/%
紫杉状海门冬 <i>Asparagopsis taxiformis</i>	94.94	35.02	0.00	35.02
哈维羽藻 <i>Bryopsis harveyana</i>	89.97	17.37	1.22	16.15
茎刺藻 <i>Caulacanthus ustulatus</i>	94.12	35.96	0.02	35.94
盾叶蕨藻 <i>Caulerpa peltata</i>	61.42	34.43	3.97	30.46
衫叶蕨藻 <i>Caulerpa taxifolia</i>	95.26	29.43	2.26	27.17
纵胞藻 <i>Centroceras clavulatum</i>	86.96	20.12	0.00	20.12
气生硬毛藻 <i>Chaetomorpha aerea</i>	92.11	36.11	0.27	35.84
中间硬毛藻 <i>Chaetomorpha media</i>	91.21	25.89	0.66	25.23
粗枝软骨藻 <i>Chondria dasyphylla</i>	91.09	26.90	3.63	23.27
簇生刚毛藻 <i>Cladophoropsis fasciculatus</i>	78.19	9.05	0.00	9.04
斯氏刚毛藻 <i>Cladophora stimpsonii</i>	91.55	22.81	4.66	18.15
囊藻 <i>Colpomenia sinuosa</i>	87.83	27.92	0.54	27.38
小珊瑚藻姐妹变型 <i>Corallina pilulifera f. sororia</i>	57.54	16.29	9.19	7.10
珊瑚藻 <i>Corallina</i> sp.	83.14	42.07	0.01	42.06
网球藻 <i>Dictyosphaeria cavernosa</i>	94.69	17.15	3.45	13.7
鹅肠菜 <i>Endarachne binghamiae</i>	92.13	36.73	0.01	36.72
条浒苔 <i>Enteromorpha clathrata</i>	89.17	26.89	3.09	23.80
肠浒苔 <i>Enteromorpha intestinalis</i>	93.28	31.25	1.25	30.00
缘管浒苔 <i>Enteromorpha linza</i>	97.02	39.12	0.00	39.12
钝乳节藻 <i>Galaxaura obtusata</i>	64.68	17.86	6.23	11.63
太平洋乳节藻 <i>Galaxaura pacifica</i>	74.19	5.46	0.59	4.86
乳节藻 <i>Galaxaura</i> sp.	64.68	17.93	3.41	14.52
小石花菜 <i>Gelidium divaricatum</i>	83.96	41.75	0.00	41.75
小衫藻 <i>Gigartina intermedia</i>	76.15	40.53	0.19	40.34
舌状蜈蚣藻 <i>Grateloupia livida</i>	94.46	35.91	0.00	35.91
繁枝蜈蚣藻 <i>Grateloupia ramosissima</i>	97.52	32.13	0.00	32.13

续表 4

种类	含水率/%	TC/%	IC/%	TOC/%
扇形拟伊藻 <i>Gymnogongrus flabelliformis</i>	94.09	37.68	0.00	37.68
羊栖菜 <i>Hizikia fusiforme</i>	91.55	37.02	0.27	36.75
冻沙菜 <i>Hypnea japonica</i>	86.45	16.61	1.25	15.36
南方团扇藻 <i>Padina australis</i>	89.20	20.18	0.86	19.32
多管藻 <i>Polysiphonia</i> sp.	76.82	20.25	0.00	20.25
拟鸡毛菜 <i>Pterocladia capillacea</i>	76.54	41.54	0.73	40.81
亨氏马尾藻 <i>Sargassum henslowianum</i>	88.53	39.96	0.00	39.96
全缘马尾藻 <i>Sargassum integerrimum</i>	87.06	39.57	0.00	39.57
硃洲马尾藻 <i>Sargassum naozhouense</i>	86.48	38.89	0.00	38.89
丛缘叶马尾藻 <i>Sargassum duplicatum</i>	82.52	34.62	0.00	34.62
半叶马尾藻 <i>Sargassum hemiphyllum</i>	84.31	37.30	0.11	37.19
孔石莼 <i>Ulva pertusa</i>	95.46	39.50	0.02	39.48
花石莼 <i>Ulva conglobata</i>	85.01	35.28	1.10	34.18
裂片石莼 <i>Ulva fasciata</i>	94.80	39.32	0.00	39.32
石莼 <i>Ulva lactuca</i>	82.66	15.19	6.24	8.95
囊状法囊藻 <i>Valonia utricularis</i>	93.39	40.32	0.72	39.60
指状藻 <i>Valoniopsis pachynema</i>	51.92	7.66	3.32	4.34
平均值	85.21	29.37	1.38	27.99

该海域大型海藻的平均生物量占整个海域大型底栖生物平均生物量的 40.5%，具有极高的初级生产力。该海域大型海藻的优势种共有 8 种，占整个海域优势种群的一半，其生物量和优势度除了夏季较低之外，在春季、秋季和冬季都占有相当大的比例；其中，在春季大型海藻生物量占大型底栖生物量的 45.8%，平均生物量达 $848.14\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，尤其是半叶马尾藻和拟鸡毛菜无疑分别是该海域最重要的建群生物之一。丰富的大型海藻也为该海域带来了以大型海藻为基础生产的独特食物网，蕴藏着大量直接以海藻为食的软体动物和甲壳动物及碎屑食物者。据估计约 10% 的初级产量直接通过摄食而进入食物网，其余 90% 通过碎屑或溶解有机质进入食物链(Komatsu et al, 1987, 2003)。

大型海藻通过光合作用把无机碳转化为有机碳，各大型海藻体内总有机碳含量均较高，总有机碳含量占干重最高可达 42.06%(表 5)，具有类似于热带雨林般的固碳能力(Henriksson et al, 2015)，其光合固碳

在海洋碳循环中起着至关重要的作用，可作为蓝色碳汇的主要载体。在大型海藻生长旺盛的春、冬季，海水中的 DIN 含量最低，说明大型海藻的生长吸收了大量的 DIN，因此，大型海藻可作为富营养化海域生态修复的好材料(Wu et al, 2015; 李岩 等, 2015)。

基岩质底为各类大型海藻提供了良好的附着基，因而蕴藏着非常丰富的生物资源(蒋日进, 2015)，物种多样性非常高。与三亚岩相潮间带(陈自强 等, 2013)、大连凤鸣岛潮间带(王琳, 2014)的物种多样性比较(表 5)，虽然此次调查的硃洲岛海藻场大型海藻种类数比较少，多样性指数也比较低，但 2006 年赵素芬等(2006)调查时却有 87 种；从纬度分布来看，三亚岩相潮间带的种类数最多，而大连凤鸣岛潮间带仅有 74 种，近年由于硃洲岛海水养殖污染，藻场退化较严重，种类数却比大连凤鸣岛低，与原有的纬度越低种类越丰富的规律相悖。硃洲岛平均生物量较高，而且季节变化也与三亚和大连凤鸣岛不同。三亚冬、夏季生物量大，春、秋季生物量小；凤

表 5 硃洲岛岩礁区大型海藻物种多样性与其他海域比较

Tab. 5 Comparison of macroalgae diversity between reef area of Naozhou island and other seas

海域	调查时间	大型海藻种类数	平均生物量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	多样性指数	均匀度	种类丰富度	数据来源
三亚岩相潮间带	2008 年	130	430.86	1.50	0.64	0.86	陈自强 等 (2013)
大连凤鸣岛潮间带	2011 年	74	407.07	1.42	0.88	0.50	王琳(2014)
硃洲岛	2011 年	64	454.71	1.10	0.36	0.72	本研究

鸣岛潮间带生物量夏季最大, 春季次之, 冬季最小; 而硃洲岛生物量春季最大, 夏季最小。这应与各自优势种群对水温的适应性有关。

由于潮间带是海陆生态系统的交汇带, 高潮区露空时间长, 而低潮区被海水淹没时间长, 各潮区种类具有明显的垂直分带特征。大型海藻不能耐受长时间的干燥和高温, 故在高潮区没有大型海藻的分布; 低潮区大部分时间被海水浸没, 抗失水能力较弱的底栖藻类呈带状分布, 在岩礁区形成茂密的海藻丛。优势种群半叶马尾藻和小珊瑚藻分布于低潮区以下, 囊藻和斯氏刚毛藻主要分布于低潮区, 拟鸡毛菜、纵胞藻、茎刺藻和中间软刺藻等主要分布于中下区至低潮区间。由于大型海藻具有强大的空间竞争力, 在低潮区形成密集带, 从而抑制了其他底栖固着或附着动物的生长和分布。不同调查断面的底栖生物其垂直分布又有差异, 这主要取决于浪击度。岩相潮间带生物垂直分布范围随浪击度的增强而变宽且高度上升, 而在浪击度强的礁区马尾藻等喜浪种类更加发育, 这在外海性岛屿表现尤为明显(郑成兴等, 2004; 彭欣等, 2009)。大型海藻的垂直分带与光照强度和海水的透明度密切相关。大型海藻吸收最多的光线是其本身颜色的补色光, 绿藻最需要日光光谱中的红光和部分紫光, 褐藻光合作用最主要的光是橙光和部分黄光, 红藻光合作用主要利用黄光和绿光。在垂直方向上从上往下依次分布着绿藻门、红藻门和褐藻门的种类, 与光线在水中的衰减规律相吻合。

调查海域大型海藻种类数具有显著的季节变化特征, 春季最多, 夏季最少, 这与一般海域底栖生物种类数夏季多冬季少的变化规律不一致(张华伟等, 2018; 赖廷和等, 2019)。季节间种类更替率除了春、夏季和夏、冬季较高外, 其他季节间均较低, 四季均为优势种的种类仅有鸡毛菜 1 种。大型海藻的生命周期较特殊, 由于其适温范围较小, 呈现明显的季节变化特征: 多数大型海藻在冬、春季生长茂盛, 而在夏季凋谢, 因而春季生物量最大, 而夏季生物量剧烈变小。春季茂盛的大型海藻显示出强大的空间竞争力, 从而占据了主要的岩礁基底。如马尾藻在秋末开始萌发, 生长旺盛期是在 1—3 月份, 极盛期在 4 月中旬, 5 月下旬马尾藻已经开始腐烂而逐渐消失。

3.2 大型海藻群落结构的影响因素

影响潮间带大型海藻群落结构的因素较多, 既有理化环境因素和动物摄食压力, 也有人类活动的

影响因素。硃洲岛马尾藻场位于亚热带海域, 理化环境因素具有明显的季节变化特征, 生活在该海域的大型海藻其生长繁殖、垂直分布及其季节演替与之密切相关。不同种类具有各自的生态习性, 其生物量除受本身的生活史和生命周期影响外, 也受种内和种间竞争、食物关系、栖息环境及季节演替所影响。

潮间带生物的水平分布主要受海浪和海流冲击的影响(蔡如星等, 1990; 杨万喜等, 1996), 喜浪种类如马尾藻等在浪击区得到充分发展, 其栖息密度和生物量都很大。潮间带生物的垂直分布与分带有关, 波浪及潮汐引起的干燥、温度变化等环境因子(物理因素)对潮间带生物垂直分布的上界有着重要作用, 生物因素如种间的空间竞争和耐受敌害生物侵袭的能力对下界起决定作用(郑成兴等, 2004)。

对各季节各断面大型海藻生物量与环境因子进行相关性分析发现, 大型海藻生物量与 DIN 呈显著负相关, 相关系数为 0.49, 说明大型海藻的生长需要吸收水中的 DIN, 因而在大型海藻生长旺盛的冬、春季, 海水中的 DIN 含量最低, 这是与其他海域冬季营养盐积累不一致的地方(马威, 2012; 沈国英等, 2016; 张莹, 2016; 李夏, 2016); 与水中叶绿素 a、磷酸盐和硅酸盐呈不明显的负相关, 说明大型海藻与水中叶绿素 a 存在着竞争关系, 大型海藻的生长受这三者的影响, 但影响大型海藻生长的主要因子显然是 DIN(表 6)。

潮间带作为陆海交汇作用的系统单元, 其稳定性并不高, 很容易受到人类活动的影响(施华宏, 2001)。在马尾藻场渔民们对经济种类的破坏和因之引起的次生种类的演替, 将对环境造成极大的破坏, 其结果是经济种类如半叶马尾藻、羊栖菜 *H. fusiforme*、硃洲马尾藻 *S. naozhouense*、亨氏马尾藻 *S. henslowianum* 和莫氏马尾藻 *S. macleurei* 等数量锐减甚至消失, 非经济种类尤其是生活周期短、繁殖能力强、分布广的物种如拟鸡毛菜 *P. capillacea*、囊藻 *C. sinuosa*、茎刺藻 *C. ustulatus*、斯氏刚毛藻 *C. stimpsonii*、中间软刺藻 *C. intermedius*、小珊瑚藻 *C. pilulifera*、纵胞藻 *C. clavulatum* 等取代经济种而成为优势种, 使次生型群落结构不断深化。

硃洲岛沿岸对虾养殖业和生活污水也给岩礁区带来严重的污染, 特别是夏末和秋末至冬初, 对虾养殖污水的排放给岩礁区带来大量的悬浮物和营养盐。调查发现, 靠近排污口比远离排污口的岩礁上

表 6 大型海藻生物量与环境因子的相关性分析

Tab. 6 Correlative analysis between macroalgae biomass and environmental factors

	SS	WT	盐度	pH	DIN	PO ₄ ³⁻	SiO ₃ ²⁻	Chl a	TOC	大型海藻
SS	1									
WT	-0.31	1								
盐度	-0.04	0.20	1							
pH	0.08	-0.26	-0.66**	1						
DIN	-0.16	0.36	-0.28	-0.15	1					
PO ₄ ³⁻	0.09	-0.01	0.01	-0.19	0.24	1				
SiO ₃ ²⁻	0.20	-0.47*	-0.20	-0.04	-0.02	0.10	1			
Chla	0.51*	-0.23	-0.50*	0.38	0.23	0.09	0.10	1		
TOC	0.88**	-0.14	0.16	-0.11	-0.11	0.20	0.14	0.53*	1	
大型海藻	0.06	0.12	0.07	0.18	-0.49*	-0.09	-0.10	-0.22	0.03	1

注: *为显著相关, $p < 0.05$ (双尾); **为极显著相关, $p < 0.01$ (双尾)。

覆盖有较多的沉积物, 在这些区域内的大型海藻退化也较严重。秋末为众多大型海藻特别是马尾藻的萌发季节, 悬浮物和浮游植物尤其是底栖硅藻覆盖在近岸岩礁、假根和刚萌发的嫩芽上, 对大型海藻的生长和繁殖产生严重影响。覆盖在岩礁上, 必然影响来年孢子的附着; 覆盖在假根和嫩芽上, 会造成光照不足, 影响假根的萌发和嫩芽的生长。加上全球气候变暖等不利因素的综合影响, 使马尾藻场建群生物群落严重退化, 导致潮间带生物资源趋于单一化。2006 年赵素芬等采集到大型海藻有 87 种,

而本文仅采集到 64 种, 优势种匍匐石花菜 *Gelidium pusillum*、指状藻 *V. pachynema*、中间硬毛藻 *C. media* 和常见种颤藻 *Oscillatoria* sp. 等已消失, 原来为优势种的羊栖菜 *H. fusiforme*、紫杉状海门冬 *A. taxiformis*、小杉藻 *G. intermedia*、纵胞藻 *C. clavulatum*、花石莼 *U. conglobata*、肠浒苔 *E. intestinalis* 等已很少(胡兴, 1997; 赵素芬 等, 2006)。该海域大型海藻种类数的减少, 远离岛陆的 R5 断面较沿岸其他几个断面大型海藻生物资源丰富, 足见人类活动对大型藻类资源的不利影响(图 2)。

参考文献 References

- 蔡如星, 郑锋, 王彝豪, 等, 1990. 舟山潮间带生态学研究——I. 种类组成及分布[J]. 东海海洋, 8(1): 51–60. CAI RUXING, ZHENG FENG, WANG YIHAO, et al, 1990. Studies on ecology of Zhoushen intertidal zone I, Species composition and distribution[J]. Donghai Marine Science, 8(1): 51–60 (in Chinese with English abstract).
- 陈苑, 2011. 硃洲岛地下水水质咸化和海水入侵主要成因及对策[J]. 大众科技, (4): 114–115. CHEN YUAN, 2011. Salinization of groundwater quality in Naozhou island and its main causes and countermeasures of seawater intrusion[J]. Da Zhong Ke Ji, (4): 114–115 (in Chinese).
- 陈自强, 寿鹿, 廖一波, 等, 2013. 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, 33(11): 3370–3382. CHEN ZIQIANG, SHOU LU, LIAO YIBO, et al, 2013. Community structure of benthic algae and its seasonal variation in the rocky intertidal zone of Sanya[J]. Acta Ecologica Sinica, 33(11): 3370–3382 (in Chinese with English abstract).
- 国家海洋环境监测中心, 2008. GB17378.4-2007 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社: 57–121. National Marine Environmental Monitoring Center, 2008. GB17378.4-2007 The specification for marine monitoring—Part 4: seawater analysis[S]. Beijing: Standards Press of China: 57–121 (in Chinese).
- 胡兴, 1997. 湛江硃洲岛沿岸经济海藻的种类和生态分布[J]. 怀化师专学报, 16(6): 72–75. HU XING, 1997. The species and ecological distribution of ALGAE in the Inohore regions Naozhou Island of Zhanjiang[J]. Journal of Huaihua Teachers College, 16(6): 72–75 (in Chinese with English abstract).
- 蒋日进, 2015. 枸杞岛近岸海域食物网结构研究[D]. 上海: 上海海洋大学: 1–118. JIANG RIJIN, 2015. Research on the food web structure in the coastal areas of Gouqi Island[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University: 1–118 (in Chinese with English abstract).
- 赖廷和, 何斌源, 黄中坚, 等, 2019. 防城河口湾潮间带大型底栖动物群落结构研究[J]. 热带海洋学报, 38(2): 67–77. LAI TINGHE, HE BINYUAN, HUANG ZHONGJIAN, et al, 2019. Study on the macrozoobenthic community structure in intertidal zone of Fangchenghe Estuary of Guangxi, China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 38(2): 67–77 (in Chinese with English abstract).
- 李荣冠, 江锦祥, 鲁琳, 等, 1993. 大亚湾潮间带底栖生物种类

- 组成与分布[J]. 海洋与湖沼, 24(5): 527–535. LI RONGGUAN, JIANG JINXIANG, LU LIN, et al, 1993. Species composition and Distribution of benthos in intertidal zone of Daya Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 24(5): 527–535 (in Chinese with English abstract).
- 李夏, 2016. 黄东海浮游植物群落结构季节和年际变化特征模拟分析[D]. 天津: 天津科技大学: 1–72. LI XIA, 2016. Simulation analysis of seasonal and interannual variation of phytoplankton community structure in the Yellow and East China Sea[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology: 1–72 (in Chinese with English abstract).
- 李岩, 付秀梅, 2015. 中国大型海藻资源生态价值分析与评估[J]. 中国渔业经济, 33(2): 57–62. LI YAN, FU XIUMEI, 2015. Analysis and valuation of ecological value of large macroalgae in China[J]. Chinese Fisheries Economics, 33(2): 57–62 (in Chinese with English abstract).
- 罗余方, 2017. 环境人类学视域下的海洋渔业生态环境问题研究——以粤西碓洲岛渔业生态环境变迁史为例[J]. 青海民族研究, 28(3): 73–77. LUO YUFANG, 2017. On marine fishery ecological environment from the view of environment anthropology—A case of the fishery ecological environment historical changes of Naozhou Island in the west of Guangdong Province[J]. Qinghai Journal of Ethnology, 28(3): 73–77 (in Chinese with English abstract).
- 马威, 2012. 南海北部浮游植物群落的生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学: 1–74. MA WEI, 2012. Ecological study on phytoplankton community in the northern South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China: 1–74 (in Chinese with English abstract).
- 彭欣, 谢起浪, 陈少波, 等, 2009. 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, 40(5): 584–589. PENG XIN, XIE QILANG, CHEN SHAOBO, et al, 2009. Distribution of intertidal benthos and the human impact in Nanji islands, China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 40(5): 584–589 (in Chinese with English abstract).
- 沈国英, 黄凌风, 郭丰, 等, 2016. 海洋生态学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社: 116–143. SHEN GUOYING, HUANG LINGFENG, GUO FENG, et al, 2016. Marine ecology[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press: 116–143 (in Chinese).
- 施华宏, 2001. 滨海采捕对岸带生物资源的影响及管理对策[J]. 海洋开发与管理, 18(2): 32–34. SHI HUAHONG, 2001. The effect derived from beach catch on coastal living resources and corresponding countermeasures of management[J]. Ocean Development and Management, 18(2): 32–34 (in Chinese with English abstract).
- 王琳, 2014. 大连凤鸣岛潮间带大型底栖海藻的群落结构及多样性[D]. 大连: 辽宁师范大学: 1–41. WANG LIN, 2014. Community structure and species diversity of intertidal benthic macro-algae in Fengming Island of Dalian[D]. Dalian: Liaoning Normal University: 1–41 (in Chinese with English abstract).
- 肖汉洪, 李方满, 2003. 广东碓洲岛潮间带蟹类的组成及生态分布[J]. 贵州科学, 21(4): 59–62. XIAO HANHONG, LI FANGMAN, 2003. The composition and ecological distribution of intertidal crabs of Naozhou island in Guangdong[J]. Guizhou Science, 21(4): 59–62 (in Chinese with English abstract).
- 杨万喜, 陈永寿, 1996. 嵎泗列岛潮间带群落生态学研究 I. 岩潮间带底栖生物群落组成及季节变化[J]. 应用生态学报, 7(3): 305–309. YANG WANXI, CHEN YONGSHOU, 1996. Community ecology of intertidal zone of Shengsi archipelago I. Species constitution and seasonal variation of benthic biocommunity in rocky intertidal zone[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 7(3): 305–309 (in Chinese with English abstract).
- 张华伟, 彭欣, 刘俊峰, 等, 2018. 南麂列岛冬夏季潮间带大型底栖生物群落结构[J]. 上海海洋大学学报, 27(1): 133–140. ZHANG HUAWEI, PENG XIN, LIU JUNFENG, et al, 2018. Community structure of macrobenthos in the intertidal zones of Nanji Islands in winter and summer[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 27(1): 133–140 (in Chinese with English abstract).
- 章守宇, 孙宏超, 2007. 海藻场生态系统及其工程学研究进展[J]. 应用生态学报, 18(7): 1647–1653. ZHANG SHOUYU, SUN HONGCHAO, 2007. Research progress on seaweed bed ecosystem and its engineering[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 18(7): 1647–1653 (in Chinese with English abstract).
- 张莹, 2016. 渤海中部浮游植物与环境因子的空间关系及季节差异分析[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所: 1–75. ZHANG YING, 2016. Spatial correlation and seasonal variation of phytoplankton and environmental factors in the central Bohai Sea[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences: 1–75 (in Chinese with English abstract).
- 赵素芬, 孙会强, 袁振江, 等, 2006. 碓洲岛春季底栖海藻资源[J]. 上海水产大学学报, 15(3): 321–327. ZHAO SUFEN, SUN HUIQIANG, YUAN ZHENJIANG, et al, 2006. Resources of benthic algae from intertidal zone on Naozhou Island in spring[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 15(3): 321–327 (in Chinese with English abstract).
- 郑成兴, 李荣冠, 江锦祥, 等, 2004. 泉州湾岩相潮间带底栖生物生态研究 I. 物种多样性与分布特征[J]. 生物多样性, 12(6): 594–610. ZHENG CHENGXING, LI RONGGUAN, JIANG JINXIANG, et al, 2004. An ecological study on the benthos of the rocky intertidal zone in Quanzhou Bay. I.

- Species diversity and its distribution[J]. Biodiversity Science, 12(6): 594–610 (in Chinese with English abstract).
- HENRIKSSON P, EGESKOG J, 2015. Ecosystem services deriving from sugar kelp cultivation in Skagerrak[R]. Stockholm: KTH.
- KOMATSU T, IGARASHI C, TATSUKAWA K, et al, 2003. Use of multi-beam sonar to map seagrass beds in Otsuchi Bay on the Sanriku Coast of Japan[J]. Aquatic Living Resources, 16(3): 223–230.
- KOMATSU T, KAWAI H, 1987. Diurnal changes of pH distribution and the cascading of shore water in a *Sargassum forest*[J]. Journal of Oceanography, 42(6): 447–458.
- LIU J Y, 2013. Status of marine biodiversity of the China Seas[J]. PLoS One, 8(1): e50719.
- STENECK R S, GRAHAM M H, BOURQUE B J, et al, 2002. Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future[J]. Environmental Conservation, 29(4): 436–459.
- WU HAILONG, HUO YUANZI, HU MING, et al, 2015. Eutrophication assessment and bioremediation strategy using seaweeds co-cultured with aquatic animals in an enclosed bay in China[J]. Marine Pollution Bulletin, 95(1): 342–349.