

枸杞岛铜藻空间分布格局初探

章守宇*, 毕远新, 吴祖立

(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 为了查清铜藻空间分布格局与影响因子之间的关系, 采用水下采样方法对不同生境条件下铜藻分布和生长情况进行了调查, 并从大小两个尺度(站点间和站点内)分析了铜藻空间分布与影响因子之间的关系。结果发现, 在站点尺度上, 铜藻多集中分布于隐蔽的内湾处, 分布密度和株高显著高于暴波站点($P < 0.05$), 暴波站点的波浪和水流运动大小以及浊度显著高于隐蔽站点($P < 0.05$), 说明暴波强度是影响铜藻水平分布和生长的主要因子之一; 在站点内, 铜藻垂直分布特征明显, 潮间带低潮区铜藻分布密度和株高显著高于潮下带($P < 0.05$), 且分布在潮间带低潮区的藻苗平均株高最高; 铜藻分布密度和株高与附着基粗糙度、坡度、坡向表现出一定的相关性, 但经相关性分析表明, 水深与铜藻分布密度最相关($r = -0.337, P = 0.001$), 粗糙度次之($r = 0.175, P = 0.092$), 与坡度和坡向相关性不高, 说明了与水深相关的光照条件可能是影响铜藻垂直分布和生长的另一个主要因子。研究表明, 附着基物理特征不是影响铜藻分布的主导因子, 由波浪和水流运动引起的沉积物再悬浮影响到铜藻所需的光照条件, 进而影响到铜藻的分布与生长, 以此推断出沉积物可能是影响铜藻空间分布格局的主导因子。

关键词: 铜藻; 尺度; 水深; 暴波强度; 光照

中图分类号: Q 178.1; S 917

文献标志码: A

海藻场是以大型底栖海藻为支持生物的典型近岸海域生态系统之一, 具有改善富营养化水体^[1-2], 为鱼类提供优良的产卵、摄食和栖息场所^[3]等生态功能。近几十年来, 大型海藻生物量明显减少^[4-5], 其原因有物理、化学、生物等多方面因素, 作用结果表现为海藻种群分布格局及数量上发生变化^[6-7], 海藻种群分布特征是对外界干扰的一种响应机制^[8]。目前已查明的大型海藻种群分布格局多从单一尺度^[9]或单一因子^[10-11]对其分布影响进行的研究, 而对于从多尺度及多因子影响下的大型海藻空间分布格局的研究并不多见。大型海藻在站点尺度上经常出现斑块状不连续分布的现象^[12], 即使在几十厘米小尺度范围内这种斑块状现象也依然存在^[13], 由于这种斑块状分布特征同时受多种因子共同作用^[14], 而其中的某一因子可能对其分布起到关键性作用^[15]。如何从多因子中

提取出关键因子极为重要, 因此, 有必要从多尺度及多因子角度探讨其空间分布格局形成的主因。

枸杞岛海藻场支撑物种为铜藻(*Sargassum horneri*), 观察发现枸杞岛铜藻分布极不均衡, 并且在岛礁周围形成了斑块状不连续的分布特征。因此, 为查清铜藻的分布规律, 本研究以不同尺度下铜藻生境特征为角度, 探讨该海藻场支撑物种铜藻的分布规律, 解析其影响因子及贡献, 从中寻找影响铜藻斑块状分布的关键因子, 以为海藻场保护及修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

枸杞岛(30°42.82' ~ 30°43.00'N, 122°46.78' ~ 122°47.09'E)陆地面积 5.6 km², 属亚热带季风性气候, 冬季多北风, 夏季南风盛行, 潮汐为正规半

收稿日期:2012-11-13 修回日期:2013-03-22

资助项目:国家自然科学基金项目(41176110);国家海洋公益性行业科研专项(201005013-3);国家“九七三”项目(2011CB111608)

通信作者:章守宇, E-mail: syzhang@shou.edu.cn

日潮,潮差 4 ~ 5 m,表层多年平均水温在 17 ~ 19 °C。枸杞岛海域主要受长江冲淡水 and 台湾暖流交互影响,冬季海水混浊,而夏季海水较清澈^[16]。岛的西北-东南方向大致呈 T 形状,东南和西南部岸线分布有累计约 2 000 m 的两处沙滩,其余岸线 90% 为岩礁,其潮间带和潮下带岩礁上着生大型底栖海藻。岛西北侧海域有约 800 hm² 贻贝养殖筏,而东南侧易受大风影响,贻贝养殖筏较少。大面积的贻贝养殖区对波浪袭岸起到一定缓解作用,同时贻贝加工业也带来了大量污水携带山体泥沙直接排放入海,可能是海区沉积物增多的一个重要人为因素。

1.2 站点选择

根据前期调查,枸杞岛东南侧铜藻稀少,仅在几个内湾处有小范围的集中分布,而西北侧铜藻分布较多,且呈现斑块状不连续的分布状态。基于枸杞岛铜藻的这种空间分布特点,本研究选取了 5 个铜藻分布具有代表性的站点(图 1)进行了调查。 S_1 站点位于枸杞岛西北侧,其北面有面积较大的贻贝养殖区,是一个较隐蔽的站点(受波浪影响小),且受人为干扰少; S_2 为西南侧的暴波站点(受波浪影响大),与 S_1 站点直线距离约 30 m,可作为 S_1 站点的对照点,便于比较岛礁南北两侧铜藻空间分布上的差异; S_3 为枸杞岛北侧一处暗礁站点,离岸距离约 20 m,潮流通畅,其北侧有面积较大的贻贝养殖区,距离贻贝加工区较近,人为干扰因素较多; S_4 站点位于岛西南侧内湾处,是一个较隐蔽的站点,外侧为贻贝养殖区; S_5 站点位于岛东南侧的内湾处,外侧有小范围贻贝养殖区。由于岛东北侧潮流湍急且风浪较大,并且没有发现铜藻分布,所以未设置调查站点。

1.3 采样方法

枸杞岛铜藻的孢子体散放期为 5 月中旬到 6 月初,持续散放时间约为 20 d,而各调查站点铜藻孢子体散放日期较集中,差异较小。本研究从 2011 年 8 月底至 9 月初对 5 个站点铜藻(平均株高 5.6 cm)的分布生长情况进行了调查,采用 SCUBA 潜水方法进行水下采样并记录。每一站点选取 3 个样带,样带间隔约为 3 m,每一样带沿垂直于岸线,自铜藻分布上缘的潮间带区域至下缘的潮下带区域,随机选 7 个不同水深的样方,样方大小为 30 cm × 30 cm。

为查清附着基(岩礁)特征参数是否对铜藻

分布生长产生影响,分别测定了样方内岩礁的坡度、坡向、粗糙度以及铜藻株高度和株密度,同时对取样点进行编号记录并拍照以便做进一步分析。坡度(0° ~ 90°)使用坡度仪(JCC-B2)进行测量;坡向用潜水三联表(MARES)进行定位,并归类为 4 个方向范围(表 1)。附着基粗糙度分为 4 种类型,采用目测方法进行描述(表 2)。

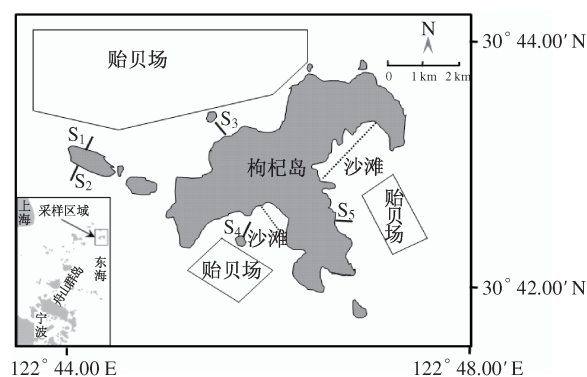


图 1 枸杞岛 5 个调查站点位置

Fig. 1 Map of Gouqi island showing locations of the five study sites

表 1 4 个坡向定义

Tab. 1 The definitions of four slope aspects

坡向 slope aspect	北 N	东 E	南 S	西 W
坡向范围 aspect range	316° ~ 45°	46° ~ 135°	136° ~ 225°	226° ~ 315°

表 2 附着基粗糙度类型描述

Tab. 2 Description of substrate roughness type

类型 type	I	II	III	IV
描述 description	礁石表面 较光滑	礁石表面 粗糙	礁石表面 结构复杂 有棱角但 不突出	礁石表面 结构复杂 有棱角且 突出

铜藻分布水深数据从潜水电表(MARES NEMO SPORT)上读取,同时记录采样时间,根据崂山潮汐表,以平均海平面为基准面,利用公式法计算任意时刻采样点的水深^[17]。获得的水深数据分为 8 个组,I组 121 ~ 160 cm(潮间带低潮区上部);II组 161 ~ 200 cm(潮间带低潮区中部);III组 201 ~ 240 cm(潮间带低潮区下部);IV组 241 ~ 280 cm、V组 281 ~ 320 cm、VI组 321 ~ 360 cm、VII组 361 ~ 400 cm、VIII组 401 ~ 550 cm(潮下带)。

为比较站点尺度(site scale)上 S_1 和 S_2 南北站点间铜藻水平分布差异及其与水环境因子之间的关系,对水环境因子进行了测量。7—11 月间每月 4 次,采用多功能水质仪(ALEC AAQ1183)同步测量 S_1 和 S_2 站点的浊度,测量结果取 0~4 m 水深范围内浊度的平均值,用于分析波浪和水流运动造成沉积物再悬浮对光照条件的限制作用;暴波强度(wave exposure)代表了站点间受波浪及水流作用影响的程度,采用石膏块方法测量石膏损失量计算得到^[18]。

$$\text{暴波强度} = M_1 \times T_2 / M_2 \times T_1$$

式中: M_1 代表现场放置石膏块的质量损失; M_2 代表石膏块在静水中的质量损失; T_1 代表石膏块在现场测量的时间; T_2 代表石膏块在静水中放置的时间。采用石膏块法可有效解决波浪和水流运动(water motion)同时作用的影响。调查期间每一站点在同一水深处测量 3 次,每次 3 个重复。另外还对 S_1 站点不同水深处的暴波强度进行了测量,以说明暴波强度随水深的变化情况。

1.4 数据分析

数据使用 SPSS 13.0 软件,采用单因素方差和 t -test 对数据进行统计分析,并对影响因子进行偏相关分析。以 $P < 0.05$ 作为差异显著性水平, $P < 0.01$ 表示差异极显著,描述性统计值采用平均值 \pm 标准误(mean \pm SE)表示。

2 结果与分析

2.1 铜藻斑块状分布特征

在站点内,不同样方内的铜藻密度存在显著差异,即使在同一水深范围内其差异也比较显著(图 2)。而对站点内铜藻种群整体来说,其分布格局较一致。如: S_1 和 S_3 站点铜藻集中分布在 3 m 水深范围, S_5 站点铜藻集中分布在 1~2 m 水深范围内,其聚集分布特征明显,而 S_2 站点铜藻则在不同水深处呈现低密度的均匀分布特征。这体现了铜藻在外界环境条件作用下的趋同性分布特征,这种趋同性表现为隐蔽站点(S_1)铜藻在某一水深范围内聚集分布以及在暴波站点(S_2)不同水深范围内铜藻稀疏的均匀分布上。

在站点尺度上,铜藻藻苗在潮间带低潮区上部分布密度最大,显著高于潮下带 280 cm 以下各水深组铜藻密度($P < 0.05$)(图 3)。在潮下带随水深增加,铜藻分布密度逐渐减少,在平均

海平面 5 m 以下铜藻稀少,6 m 以下很难发现有铜藻分布,而在潮间带中潮区及潮间带高潮区没有发现铜藻分布。在潮间带低潮区下部铜藻株高显著高于其它各水深组($P < 0.05$),潮间带低潮区上部显著高于潮下带各水深组($P < 0.05$)(图 4)。这一结果表明了铜藻分布与水深因子关系密切。

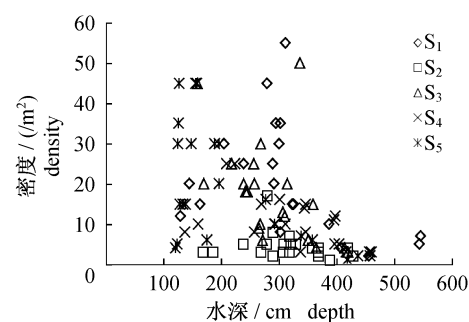


图 2 105 个样本铜藻密度与水深的关系

Fig. 2 The relation between depth and density of 105 samples

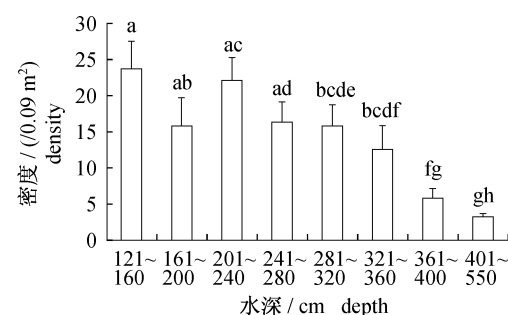


图 3 不同水深组平均密度

标有不同小写字母者表示组间差异显著;标有相同小写字母者表示组间差异不显著;下同。

Fig. 3 Mean densities in different depths

Different lowercase letters meant significant difference at 0.05 level among treatments ($P < 0.05$); Same lowercase letters meant non significant difference at 0.05 level among treatments ($P > 0.05$); The same below.

2.2 铜藻分布与附着基物理特征的关系

在站点尺度上,铜藻分布密度与坡度之间差异不显著($P > 0.05$),但随坡度的增加,密度有逐渐减小的趋势。小坡度附着基上铜藻株高极显著高于坡度大的附着基($P < 0.01$),说明附着基坡度大影响了铜藻生长,这种现象也许与种间竞争有关,坡度大可能限制了铜藻直立向上生长的空间;坡向对铜藻附着密度影响不大,但坡向与铜藻

生长关系密切,西向显著高于北向($P < 0.05$),并极显著高于东向($P < 0.01$),南和北朝向极显著高于东向($P < 0.01$),说明铜藻在西南朝向附着基上的生长好于东北朝向,这可能与铜藻的喜光性有关;附着基粗糙度水平与铜藻附着密度关系密切,而与株高不相关。随附着基表面粗糙程度增加,铜藻附着密度逐渐增大,Ⅲ和Ⅳ级粗糙度的附着基上的铜藻附着密度显著高于Ⅰ级($P < 0.05$)。在站点内同一水深处,样方间的附着基物理特征存在差异,说明了站点内铜藻的斑块状分布格局可能是由附着基质物理特征决定的,铜藻附着和生长对附着基具有一定的选择性。而对于站点间的附着基物理特征来说差异不大,说明铜藻水平分布差异可能是由其它相关因子引起的。

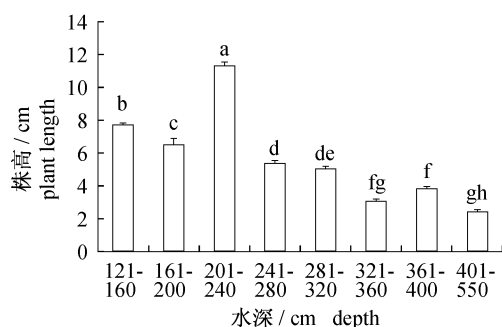


图4 不同水深组平均株高

Fig. 4 Mean plant lengths in different depths

2.3 影响铜藻分布和生长的附着基物理特征与水深间相关性分析

铜藻附着密度和株高与影响因子的偏相关性分析结果表明,水深是最相关因子($r = -0.337$, $P = 0.001$),其次是粗糙度($r = 0.175$, $P = 0.092$),坡度和坡向相关程度最低(表3)。说明水深对铜藻分布和生长的影响远大于附着基物理特征,因此,水深对铜藻空间分布起重要作用。而水深的变化又与光照条件、波浪和水流运动大小、沉积状况等因子相关,查清与水深相关的水环境因子间关系将对铜藻分布格局研究起到决定性作用。

2.4 铜藻分布特征与水环境因子间关系

从站点尺度对5个站点同一水深范围内(201~320 cm)铜藻分布生长情况进行了比较, S_1 和 S_3 北侧两个隐蔽站点铜藻密度和株高显著高于较暴波的南侧 S_2 站点($P < 0.05$) (图5

和图6)。而 S_4 站点铜藻株高显著高于其它各站点($P < 0.05$),说明此站点的环境条件适于藻苗快速生长。枸杞岛西北侧铜藻分布生长情况好于东南侧,说明了枸杞岛铜藻在站点尺度上的空间分布差异受地理环境条件影响,可能存在两方面因素:一是岛东南侧部分沙滩使铜藻的附着基面积减少;二是枸杞岛南北两侧受波浪影响的程度不同。为证明南北两侧是否存在由暴波强度不同引起的铜藻分布差异,下面对站点尺度上的 S_1 和 S_2 站点铜藻分布生长及水环境差异进行对比。

表3 铜藻密度和株高与影响因子的偏相关分析

Tab. 3 Partial correlation analysis between plant density and length of *S. horneri* and influence factor

		坡度 slope	坡向 aspect	粗糙度 rough	水深 depth
密度 density	相关系数 r	-0.026	-0.029	0.175	-0.337
	自由度 df	100	100	100	100
	相关概率 P	0.801	0.778	0.092	0.001
株高 length	相关系数 r	0.032	0.063	-0.176	-0.220
	自由度 df	100	100	100	100
	相关概率 P	0.758	0.548	0.091	0.033

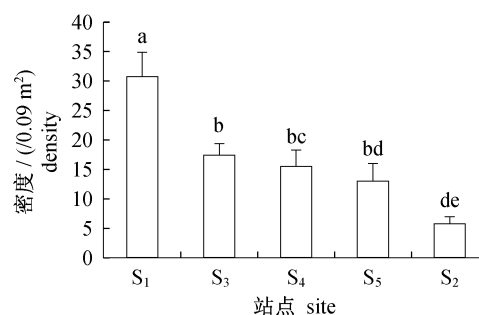


图5 不同站点间平均密度

Fig. 5 Mean densities at different sites

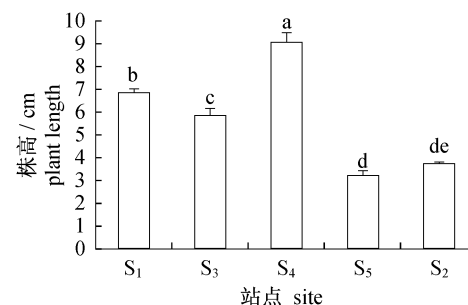


图6 不同站点间平均株高

Fig. 6 Mean plant lengths at different sites

分析选取了4个水深范围对 S_1 和 S_2 站点的铜藻分布和生长情况进行了比较。 S_1 站点在IV、V和VI 3个水深组株密度显著高于 S_2 站点 ($P < 0.05$) (图7)。 S_1 站点在IV组的密度显著高于VII组 ($P < 0.05$), 而 S_2 站点各水深组间密度差异不显著 ($P > 0.05$), 这在一定程度上说明了暴波站点铜藻孢子体的均匀散布以及在隐蔽站点集中散布的特点, 这一分布格局是受波浪和水流运动引起的。 S_1 站点在IV和V两个水深组铜藻株高极显著高于 S_2 站点 ($P < 0.01$), 而在VI和VII水深组 S_1 和 S_2 站点间株高差异不显著 ($P > 0.05$) (图7和图8), 说明造成 S_1 和 S_2 站点铜藻株高差异的主要因子可能是与水深相关的光照条件。因为 S_2 站点各水深组间株高差异不显著 ($P > 0.05$), 可能是由于光照强度低于铜藻生长需要的某一阈值时, 铜藻生长受到抑制, 在暴波站点不同水深组的光照条件均抑制了铜藻生长, 反映在 S_2 站点不同水深组铜藻生长差异不显著上。因此, 光照条件是影响铜藻分布和生长的重要影响因子, 而由波浪和水流运动引起的沉积物再悬浮可能导致了海水浊度增加, 间接地影响了铜藻生长所需的光照强度。为查明 S_1 和 S_2 站点间与光照强度相关的影响因子, 下面对两站点的海水浊度和暴波强度进行了比较。

S_1 和 S_2 站点7—11月间浊度经多次测量的发现, S_1 站点浊度(除8月份差异不显著外)显著低于 S_2 站点 ($P < 0.05$) (图9), 说明 S_2 站点水体中的悬浮物数量高于 S_1 站点, 水体中的悬浮物增多可能是由波浪和水流运动引起沉积物再悬浮而产生的, 进而影响到光照条件。因此, S_1 站点的光照条件可能要好于 S_2 站点, 更有利于铜藻快速生长。

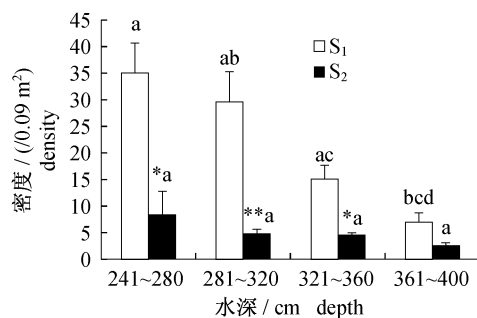


图7 S_1 和 S_2 间不同水深组密度比较

Fig. 7 Mean densities comparison in four depth classes between S_1 and S_2

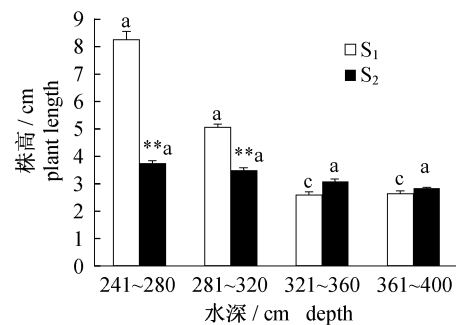


图8 S_1 和 S_2 间不同水深组株高比较

用 t 检验法比较同一水深组 S_1 和 S_2 间差异, ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$), * 表示差异显著 ($P < 0.05$), 无 * 表示不显著。同一站点的不同水深组用单因素方差分析进行比较。

Fig. 8 Mean plant lengths comparison in four depth classes between S_1 and S_2

Using t -test to compare between S_1 and S_2 in the same depth group, asterisks denote significant results at $P < 0.05$ (*), $P < 0.01$ (**), $P > 0.05$ (without *). Using one-way ANOVA analysis to compare the statistical significance at the different depths of the same site.

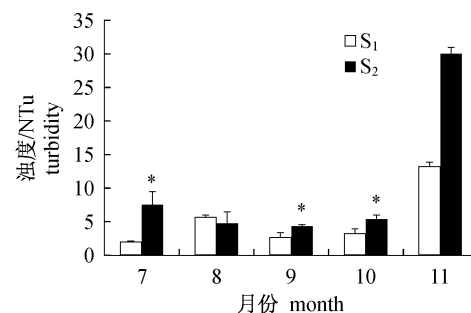


图9 S_1 和 S_2 站点间不同月份浊度变化

Fig. 9 Turbidity variation in different months between S_1 and S_2

用石膏法测量 S_1 和 S_2 站点间暴波强度, 结果表明: 暴波强度与水深呈负相关(表4), 而在同一水深处 S_2 站点暴波强度极显著高于 S_1 站点 ($P < 0.01$)。由于暴波强度间接反映了波浪和水流运动大小, 说明, 北侧 S_1 站点比南侧 S_2 站点更加隐蔽, 受波浪和水流运动影响较小, 沉积物再悬浮的数量可能较少, 海水浊度低, 为铜藻生长提供了良好的光照条件。枸杞岛南北两侧在海水浊度上的差异正与枸杞岛夏季盛行东南风以及北侧大面积的贻贝养殖筏缓解波浪的作用结果相吻合。因此, 暴波强度引起的沉积物再悬浮可间接影响铜藻的生长及分布格局。

表 4 S_1 和 S_2 站点间暴波强度比较
Tab. 4 Wave exposure comparison between S_1 and S_2

实验 experiment	水深/cm depth	暴波强度 wave exposure(mean \pm SE, $n = 3$)
2011-09-09		
S_1	326	6.09 \pm 0.06
S_1	516	3.73 \pm 0.03
S_1	646	2.65 \pm 0.04
P		$P = 0.001$
2011-09-04		
S_1	510	3.65 \pm 0.03
S_2	510	3.78 \pm 0.04
P		$t = -5.89, P = 0.005$
2011-09-06		
S_1	508	3.51 \pm 0.04
S_2	508	3.87 \pm 0.06
P		$t = -10.05, P = 0.001$
2011-09-09		
S_1	500	3.60 \pm 0.05
S_2	500	3.81 \pm 0.02
P		$t = -7.28, P = 0.002$

3 讨论

3.1 铜藻空间分布特征

枸杞岛铜藻空间分布格局总体上呈斑块状聚集分布且具有明显的垂直分布特点,这种分布方式可能说明了铜藻在不同站点内对不同环境作用下所表现出的协同性反应,是对外界环境条件适应的结果,同时说明了铜藻在水平分布上的差异受环境条件制约。在受波浪和水流运动影响小的 S_1 站点,铜藻分布密度较高,更趋于聚集分布,易形成斑块状分布状态。而在受波浪和水流运动影响大的 S_2 站点,铜藻分布密度较稀疏,因此更趋于离散的均匀分布。由于适宜铜藻分布和生长的空间有限,稀疏的个体分布难以形成优势种群,可能会在不利因素的影响下逐步消失,结果表现为枸杞岛近岸海域铜藻斑块状不连续的分布特征。

铜藻垂直分布的调查结果说明了在潮下带区域铜藻株高和密度与水深呈负相关,而潮间带低潮区是适宜铜藻分布和生长的最适宜区域。孙建璋等^[19]对铜藻在不同水层吊养实验证明了其喜光性特点,有研究表明由于受光照条件的限制,海藻分布被限制在一定水深范围内^[3]。铜藻集中分布于低潮带区域,可能是受光照条件影响,由于

受海水浊度影响,潮间带低潮区光照条件适宜铜藻生长,而在深水区铜藻生长可能因光照强度减弱而受抑制。在潮间带中高潮区没有发现铜藻植株可能是受干出条件的限制,长时间干出可能导致海藻死亡^[20]。另外,由于暴波强度大小随水深减小而增大^[7],在一定程度上限制了植食生物摄食的影响^[21],以及在浅水区沉积物数量少提高了海藻孢子附着率^[22],这些研究进一步说明了浅水区更有利于铜藻分布,导致了铜藻垂直分布上移,缩窄了铜藻的分布范围,使其更趋于集中分布在浅水区。由于调查区域岩礁基质的坡度大,而适宜铜藻分布的水深范围又小,因此铜藻则很难在这一区域形成较宽范围的分布带。

对于站点内铜藻分布上的差异,尤其是在同一水深范围内铜藻的分布也不均匀,呈现斑块状分布格局,则可能是由于附着基物理特征差异对铜藻分布产生的影响,毕竟在同一水深处的小尺度范围内,一些影响因子(波浪、水运动、光照、温盐等)的差异较小,不会成为影响其斑块状分布的主要因子。铜藻在较粗糙的附着基表面分布密度大,可能是由于粗糙的附着基增加了附着表面积,并使假根更容易渗入到基质表层增加附着牢固度,减少被波浪和水流移除的风险^[23-26]。另外,粗糙的附着基质结构复杂多样,这种粗糙结构具有较高的空间异质性,创造了一些生存空间免受生物和非生物因子的影响,这可能为铜藻附着和生长创造了有利的条件。说明了附着基质在结构上的差异导致了铜藻分布不均,可能是同一水深范围铜藻斑块状分布的主要原因。而亲本的聚集分布,更可导致补充群体数量集中分布于亲本附近,Kendrick 等^[12]研究了马尾藻孢子体大多数(98%)附着在距离亲本 1 m 的直径范围内,而海藻种群的聚集分布还可有效减少植食动物摄食的压力^[27],这种聚集效应可能更进一步加剧了铜藻斑块状分布的格局。另外,本研究通过潜水观察,在铜藻繁殖季节由于受附着基之间物理特征差异的影响,在结构复杂且较突出的附着基上,铜藻植株生长快速,繁茂地漂浮于水表面,形成斑块状漂浮的繁殖群体。而对于未达到快速生长条件的铜藻来说,则很难形成优势种群。因此,铜藻种群很难形成连续的分布带,则必然形成斑块状分布格局。

在站点尺度上,铜藻受波浪和水流作用影响

较大,铜藻在平静水域集中分布,而在暴波站点分布稀疏。由于低水流作用下海藻孢子散放后比较集中,而在高水流作用下孢子密度容易被水流稀释,将孢子冲离附着基质^[28],这将减少铜藻孢子体在适合其生长附着基上的着床数量。另外,较大的波浪和水流还能引起藻体断裂或将藻体从附着基上移除^[29],波浪的移除作用也是造成海藻斑块状分布的重要因素^[30]。波浪和水流的作用可引起沉积物再悬浮导致海水透明度下降,影响铜藻的光照条件,限制了铜藻的生长及存活,致使铜藻生物量降低,由于亲本数量少,补充群体数量会更少^[31],进一步解释了铜藻在暴波站点分布稀少的原因。因此,在暴波强度高的站点不利于铜藻种群广泛分布。

3.2 影响铜藻空间分布格局的关键因子分析

从世界范围看,海藻的分布格局与海水温度和日照时长最相关^[32],而对于枸杞岛海域来说,站点间海水的温度、盐度、营养盐等因子差异可能不会很大,对枸杞岛铜藻空间分布格局产生的影响可能较小。在人类活动影响下,近岸海区营养盐的增多导致了海区富营养化程度提高,进一步加剧了海水透明度的下降,这在一定程度上影响到底栖铜藻的光照条件,然而在距离仅 20 m 的 S₁ 和 S₂ 间,由富营养化造成的海水透明度下降在两个站点间形成的差异可能不大。而受人类活动影响,沉积物在近岸海区大量积累,在波浪和水流的作用下其分布也发生改变,可能影响了底栖铜藻的附着、生长以及分布格局。沉积物在波浪和水流以及其它因子的作用影响下,直接或间接影响了铜藻的时空分布格局,使沉积物在枸杞岛这一研究尺度下可能成为了影响铜藻分布的最关键因子。因子相关性分析结果表明了铜藻空间分布与水深最相关,与附着基质特征相关性相对较小,而水深的变化直接导致了水体光照、流速、波浪、沉积等因子的改变。由于水流大可促进海藻生长以及提高孢子成活率^[33],便于营养盐和二氧化碳摄入,促进海藻生长^[34],而调查结果表明 S₂ 站点铜藻株高和密度显著小于 S₁ 站点,说明了水流所形成的有利营养条件并没有促进铜藻生长,相反,水流速大造成了沉积物再悬浮改变了底栖海藻的光照条件,使得沉积物可能成为了影响铜藻生长的主导因子。S₂ 站点由于受波浪影响大,沉积物再悬浮程度高,海水透明度明显降低^[35],

且铜藻在不同水深的株高差异并不显著,即使在较浅的水深处,由于光照强度低,也抑制了铜藻的生长。而隐蔽站点 S₁ 受波浪影响造成沉积物再悬浮的发生率可能相对较低,水深达到 3.2 m 以下铜藻的生长才受到光照条件的限制,导致 S₁ 和 S₂ 站点间铜藻株高在深水区的差异不显著。因此,是由于波浪和水流引起了沉积物再悬浮限制了光照条件,进而抑制了铜藻的生长及存活。另外,S₃ 和 S₅ 南北两个站点与 S₁ 和 S₂ 站点铜藻分布情况相类似,进一步验证了枸杞岛铜藻在站点尺度上的分布差异,是由暴波强度不同造成南北两侧海水浊度差异,浊度的大小可能是由沉积物再悬浮的数量决定的,进而影响到铜藻生长所需的光照强度。因此本研究认为,沉积物在铜藻空间分布格局上可能起主导作用。

波浪和水流对铜藻在空间分布上影响较大,目前能缓解波浪和水流的办法是增加贻贝养殖筏面积,但还是无法解决铜藻垂直分布上移的困境,而只能通过改善海水透明度,减少沉积物排放量来解决。沉积物直接影响海藻孢子早期附着阶段以及附着后生长^[36],在水流作用下摩擦藻体^[22],降低海水透明度^[35],导致海藻种群结构及多样性发生变化^[37]。如果近岸海域沉积物减少,海水透明度提高,铜藻空间分布就可能向深水区延伸,由于深水区受波浪和水流运动影响小,被波浪移除风险减小,铜藻在近岸岩礁基质上的分布格局可能会出现连续且较宽范围的分布带。

由于本次调查在铜藻生长的幼苗阶段进行,藻苗被风浪移除的风险有所降低,而成藻阶段是否易被风浪移除,还需要从其不同生长阶段的变化情况来进行分析,这将有利于从不同生长阶段解析枸杞岛铜藻斑块状时空分布格局。另外,有关沉积物时空分布特征对铜藻分布的作用机理仍有待于深入研究,这将对认清铜藻种群时空分布机制将起积极的作用,可为今后大型底栖海藻场保护及修复提供科学依据。

数据采集得到了上海海洋大学王凯,赵静,周曦杰等的大量帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] Schramm W. Factors in influencing seaweed responses to eutrophication: some results from EU-project EUMAC[J]. *Journal of Applied Phycology*, 1999, 11

- (1):69-78.
- [2] 杨宇峰,费修纛.大型海藻对富营养化海水养殖区生物修复的研究与展望[J].青岛海洋大学学报:自然科学版,2003,33(1):53-57.
- [3] Terawaki T, Hasegawa H, Arai S, *et al.* Management-free techniques for restoration of *Eisenia* and *Ecklonia* beds along the central Pacific coast of Japan [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2001, 13 (1): 13-17.
- [4] 孙建璋,逢少军,陈万东,等.中国南麂列岛铜藻 *Sargassum horneri* 实地生态学的初步研究[J].南方水产,2008,4(3):58-63.
- [5] Terawaki T, Yoshikawa K, Yoshida G, *et al.* Ecology and restoration techniques for *Sargassum* beds in the Seto Inland Sea, Japan [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 47(1-6):198-201.
- [6] Guinda X, Juanes J A, Puente A, *et al.* Spatial distribution pattern analysis of subtidal macroalgae assemblages by a non-destructive rapid assessment method[J]. *Journal of Sea Research*, 2012, 67(1): 34-43.
- [7] Balata D, Acunto S, Cinelli F. Spatio-temporal variability and vertical distribution of a low rocky subtidal assemblage in the north-west Mediterranean [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 67(4):553-561.
- [8] Díez I, Santolaria A, Gorostiaga J M. The relationship of environmental factors to the structure and distribution of subtidal seaweed vegetation to the western Basque coast (N Spain) [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2003, 56(5-6):1041-1054.
- [9] Coleman M A. Small-scale spatial variability in intertidal and subtidal turfing algal assemblages and the temporal generality of these patterns[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2002, 267(1):53-74.
- [10] D'Amours O, Scheibling R E. Effect of wave exposure on morphology, attachment strength and survival of the invasive green alga *Codium fragile* ssp. *tomentosoides* [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 351(1-2):129-142.
- [11] Eriksson B K, Johansson G. Effects of sedimentation on macroalgae: species-specific responses are related to reproductive traits[J]. *Oecologia*, 2005, 143(3):438-448.
- [12] Kendrick G A, Walker D I. Dispersal of propagules of *Sargassum* spp. (Sargassaceae: Phaeophyta): Observations of local patterns of dispersal and consequences for recruitment and population structure [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1995, 192(2):273-288.
- [13] Vanderklift M A, Lavery P S. Patchiness in assemblages of epiphytic macroalgae on *Posidonia coriacea* at a hierarchy of spatial scales [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 192:127-135.
- [14] Underwood A J. Grazing and disturbance: an experimental analysis of patchiness in recovery from a severe storm by the intertidal alga *Hormosira banksii* on rocky shores in New South Wales [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, 231(2):291-306.
- [15] Airoidi L. Roles of disturbance, sediment stress, and substratum retention on spatial dominance in algal turf [J]. *Ecology*, 1998, 79(8):2759-2770.
- [16] 唐晓晖,王凡.长江口邻近海域夏、冬季水文特征分析[J].海洋科学集刊,2004,46:42-66.
- [17] 杨守仁.用袖珍计算器求任意时潮高和任意潮高的潮时[J].大连海运学院学报,1981(2):31-36.
- [18] Terrados J, Duarte C M. Experimental evidence of reduced particle resuspension within a seagrass (*Posidonia oceanica* L.) meadow [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, 243(1):45-53.
- [19] 孙建璋,庄定根,孙庆海,等.铜藻人工栽培的初步研究[J].南方水产,2009,5(6):41-46.
- [20] 郭赣林,董双林.干出对潮间带不同垂直位置海藻的生长及光合作用速率的影响[J].海洋湖沼通报,2008(4):78-84.
- [21] Sjöö G L, Mörk E, Andersson S, *et al.* Differences in top-down and bottom-up regulation of macroalgal communities between a reef crest and back reef habitat in Zanzibar [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 91(4):511-518.
- [22] Schiel D R, Wood S A, Dunmore R A, *et al.* Sediment on rocky intertidal reefs: Effects on early post-settlement stages of habitat-forming seaweeds [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, 331(2):158-172.
- [23] Foster M S. Regulation of algal community development in a *Macrocystis pyrifera* forest [J]. *Marine Biology*, 1975, 32(4):331-342.
- [24] Neushul M, Foster M S, Coon D A, *et al.* An in situ study of recruitment, growth and survival of subtidal algae: techniques and preliminary results [J]. *Journal*

- of Phycology, 1976, 12(4): 397 - 408.
- [25] Harlin M M, Lindbergh J M. Selection of substrata by seaweeds: optimal surface relief [J]. Marine Biology, 1977, 40(1): 33 - 40.
- [26] Denicola D M, McIntire C D. Effects of substrate relief on the distribution of *Periphyton* in laboratory streams, I. Hydrology [J]. Journal of Phycology, 1990, 26(4): 623 - 633.
- [27] Reed D C. An experimental evaluation of density dependence in a subtidal algal population [J]. Ecology, 1990, 71(6): 2286 - 2296.
- [28] 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.
- [29] Zacharias M A, Roff J C. Explanations of patterns of intertidal diversity at regional scales [J]. Journal of Biogeography, 2001, 28(4): 471 - 483.
- [30] Wernberg T, Goldberg N. Short-term temporal dynamics of algal species in a subtidal kelp bed in relation to changes in environmental conditions and canopy biomass [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 76(2): 265 - 272.
- [31] Gaylord B, Reed D C, Washburn L, *et al.* Physical-biological coupling in spore dispersal of kelp forest macroalgae [J]. Journal of Marine Systems, 2004, 49 (1 - 4): 19 - 39.
- [32] Lüning K. Seaweeds: Their environment, biogeography, and ecophysiology [M]. New York: Wiley, 1990: 527.
- [33] Ryder E, Nelson S G, McKeon C, *et al.* Effect of water motion on the cultivation of the economic seaweed *Gracilaria parvispora* (Rhodophyta) on Molokai, Hawaii [J]. Aquaculture, 2004, 238 (1 - 4): 207 - 219.
- [34] Hurd C L. Water motion, marine macroalgal physiology, and production [J]. Journal of Phycology, 2000, 36(3): 453 - 472.
- [35] Bothner M H, Reynolds R L, Casso M A, *et al.* Quantity, composition, and source of sediment collected in sediment traps along the fringing coral reef off Molokai, Hawaii [J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, 52(9): 1034 - 1047.
- [36] Vadas R L, Johnson S, Norton T A. Recruitment and mortality of early post-settlement stages of benthic algae [J]. British Phycological Journal, 1992, 27(3): 331 - 351.
- [37] Airoidi L, Cinelli F. Effects of sedimentation on subtidal macroalgal assemblages: an experimental study from a mediterranean rocky shore [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1997, 215(2): 269 - 288.

Spatial distribution pattern of *Sargassum horneri* around Gouqi Island, Shengsi, China

ZHANG Shouyu^{*}, BI Yuanxin, WU Zuli

(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This research surveys distribution and growing state of *Sargassum horneri* in different habitats by using underwater quadrat sampling method, and also studies the relationship, in both large and small scales (among sites and inside site), between the spatial distribution of *S. horneri* and influencing factors, thus provides references to protect and recover seaweed field. It has been found that among sites, many of *S. horneri* grow in sheltered bay, where plant distribution density and plant length are obviously higher than those in stations of wave exposure ($P < 0.05$), while wave, water motion, and turbidity in sites of wave exposure are inversely more remarkable than those in sheltered sites ($P < 0.05$), which suggests that water motion becomes a limiting factor on the horizontal distribution and growing of *S. horneri*. Within site, the vertical distribution of *S. horneri* has distinctive characteristics. Distribution density and plant length of *S. horneri* at the bottom of intertidal zone are obviously higher than those in subtidal zone ($P < 0.05$). Study result also shows that, in small scale, the distribution density and plant length of *S. horneri* have some degree of correlation with the roughness, slope gradient and slope aspect of attachment substances. However, correlation analysis manifests that water depth has the highest correlation with the distribution density and plant length of *S. horneri* ($r = -0.337, P = 0.001$), and roughness has the second highest correlation ($r = 0.175, P = 0.092$), while slope gradient and slope aspect merely have small correlation. So, it indicates that light condition maybe becomes the other limiting factor on the vertical distribution and growth of *S. horneri*. Study finally finds that physical characters of attachment substances are not the vital factors in affecting the distribution of *S. horneri*. We can infer that sediment is the key factor in affecting spatial distribution pattern of *S. horneri*, as a result of wave and water motion which cause resuspension of sediment to influence the light condition which *S. horneri* needs.

Key words: *Sargassum horneri*; scale; water depth; wave exposure; irradiance

Corresponding author: ZHANG Shouyu. E-mail: syzhang@shou.edu.cn