

DOI: 10.5846/stxb201301030013

毕远新, 章守宇, 王伟定, 吴祖立. 枸杞岛铜藻垂直分布格局及成因分析. 生态学报, 2014, 34(17): 4931-4937.

Bi Y X, Zhang S Y, Wang W D, Wu Z L. Vertical distribution pattern of *Sargassum horneri* and its relationship with environmental factors around Gouqi Island. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 4931-4937.

枸杞岛铜藻垂直分布格局及成因分析

毕远新^{1,2}, 章守宇^{2,*}, 王伟定¹, 吴祖立^{2,3}

(1. 浙江省海洋水产研究所, 舟山 316021; 2. 上海海洋大学, 上海 201306;

3. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090)

摘要:以枸杞岛铜藻垂直分布特征为基础,并通过现场实验分析了环境因子(沉积物、暴波强度(wave exposure)、光照强度)对铜藻幼苗阶段垂直分布及生长的影响。结果表明:铜藻的主要繁殖群体集中分布在潮间带低潮区 121—240 cm 的水深范围内,水深大于 480 cm 没有发现成藻植株;光照对铜藻的生长起重要作用,低光照强度可能不会导致铜藻的大量死亡,但明显抑制了铜藻的生长,248 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的光照强度为铜藻快速生长提供了有利条件,而并没有导致铜藻幼苗大量死亡;低暴波强度虽降低了铜藻被移除的风险,但为沉积物和附生物在铜藻附着基上的积累创造了条件,进而影响了铜藻早期定居阶段的存活;随着水深的增加,沉积物在附着基上的沉积水平显著增多($P < 0.01$),沉积物长时间的覆盖导致了铜藻幼苗大量死亡。因此说,沉积物可能是影响铜藻垂直分布格局的主要因子。

关键词:铜藻;暴波强度;光照强度;沉积物;附着基

Vertical distribution pattern of *Sargassum horneri* and its relationship with environmental factors around Gouqi Island

BI Yuanxin^{1,2}, ZHANG Shouyu^{2,*}, WANG Weiding¹, WU Zuli^{2,3}

1 Marine Fisheries Research Institute of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China

2 Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

3 East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Science, Shanghai 200090, China

Abstract: Among environmental factors governing macroalgae distribution, temperature and daylength are considered to be the most geographically relevant worldwide. However, within a particular site, depth is the most useful predictor of phytobenthic community structure. Furthermore, factors such as light intensity, wave exposure, and sediment, which are also related to depth, can also affect the distribution pattern of macroalgae within these sites. Therefore, it is important to determine the relationship between these factors and their effects on the macroalgae distribution pattern. Furthermore, it will also be important to determine how these factors influence this distribution, as well as the mechanism by which they do so. This research will provide an important basis for the ecological protection and restoration of macroalgal beds. To this end, we investigated the spatial (vertical) and temporal pattern of the distribution of *Sargassum horneri* around Gouqi Island. Through field-based experiments, we tested the effects of environmental factors (light intensity, wave exposure, and sediment) on the vertical distribution and growth of *S. horneri* germlings. Adult *S. horneri* was dominant in the lower region of the intertidal zone at a depth of 121—240 cm, with the highest density reaching 86 ind/m². Although adult *S. horneri* is sensitive to density-dependent restriction, the observed density was suitable for the survival of the plant at this depth. The

基金项目:国家海洋公益性行业科研专项(201005013-3);国家海洋局中央分成海域使用金支出项目(2011-2-2-07-3);国家自然科学基金(41176110);国家“973”项目(2011CB111608)

收稿日期:2013-01-03; **网络出版日期:**2014-03-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: syzhang@shou.edu.cn

greatest length of adult *S. horneri* at this depth was 78.2 cm. Thus, most of the reproductive population of *S. horneri* is predominantly distributed at the bottom of intertidal zone. In the subtidal zone, at a depth below 480 cm, there was an absence of *S. horneri*. This suggests that light intensity plays an important role in growth of this plant. Currently, we cannot conclude if the lower light intensity actually results in the death of *S. horneri*, but it does restrict its growth. This is supported by our observations that the *S. horneri* germlings grew more slowly under lower light intensity. We found that an light intensity of $248 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ was favorable for *S. horneri* during their rapid growth, and higher light intensity did not result in the death of a higher number of germlings. These results show that *S. horneri* flourish in highly light intensity zones. We also found that lower wave exposure reduced the risk of dislodging *S. horneri* from the substrate. The decreased disturbance of water flow in these regions created favorable conditions for the accumulation of sediment and periphyton on the substrate, which then promoted the early post-settlement stages of *S. horneri*. With increasing depth, sediment levels increased significantly on rocky substrates. Long-term coverage of the *S. horneri* germlings by deep sediment resulted in a marked increase in their death. Although there was little sediment at the bottom of intertidal zone, the higher light intensity and the increased water flow created a positive condition for the growth and survival of the *S. horneri* germlings. If there was little sediment in the subtidal zone, the distribution range of the macroalgae bed would be very broad, and the macroalgae would restore itself. Together, these observations suggest that sediment is likely the major factor that affects the vertical distribution of *S. horneri*.

Key Words: *Sargassum horneri*; wave exposure; light intensity; sediment; substrate

大型海藻空间分布格局与研究的空间尺度密切相关。就世界范围而言,温度和日照时长被认为是与大型海藻分布最相关的环境因子^[1]。在地区尺度上,水深(光照)、盐度、附着基、营养、水流运动、沉积和污染等环境因子影响海藻集群结构及分布^[1-5]。而在站点尺度上,水深是最有效的环境参数,可预期底栖海藻群落结构组成^[6]。耐干出能力、波浪作用和沙粒摩擦调控了海藻的水深分布上限^[7-9],而海藻的水深分布下限则受到生理上的限制,光照强度减弱抑制了海藻的光合作用^[10],沉积物的覆盖则限制了海藻补充群体可利用的分布空间^[11]。海藻间相互竞争作用及植食动物的摄食影响在大型海藻分布及种群数量上扮演着重要角色^[12-13]。目前,国内在非生物因素对大型底栖海藻种群结构及分布影响的研究比较少,尤其是对潮下带大型海藻分布的研究鲜见报道。

本研究定性分析了站点尺度内铜藻的季节分布变化情况,及其与环境因子(沉积物、暴波强度、光照强度)之间的关系,通过海藻现场人工移植实验验证了环境因子对铜藻分布和生长所产生的影响,同时评估和解析了环境因子对铜藻垂直分布变化所起的作用。本文对底栖大型海藻种群分布的研究可为理解大型海藻的非生物因素作用机制,以及为海藻场

生态保护和修复工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 调查站点概况

枸杞岛位于中国舟山群岛东北部。冬季主要受长江冲淡水影响,是以低盐、高营养盐、高悬浮体含量为特征的水体,夏季主要受台湾暖流影响,是具有高盐、低悬浮体含量为特征的外洋水体^[14]。调查选择在受人为因素干扰较少的枸杞岛附属岛屿黄石洞(图1, HN 站点),调查海区潮流通畅,水体较平静。

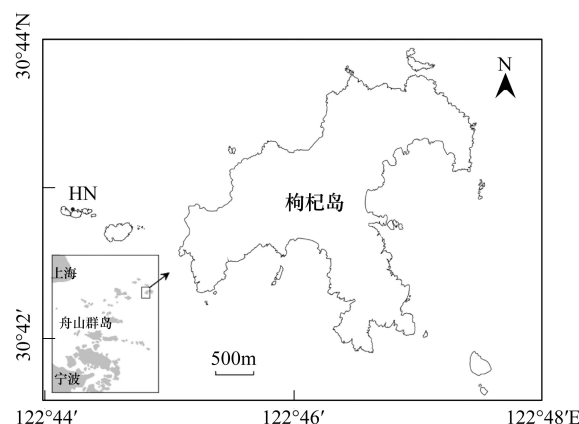


图1 枸杞岛调查站点位置

Fig.1 Map of Gouqi Island showing the locations of study sites

1.2 铜藻分布生长季节变化调查

研究从 2011 年 8 月底对 HN 站点铜藻幼苗时期的分布生长情况进行调查,采用 SCUBA (Self-Contained Underwater Breathing Apparatus) 潜水方法进行水下采样并记录。调查选取垂直于岸线的 3 条样带,样带间隔约为 3 m,自有铜藻分布上限的潮间带至分布下限的潮下带,每条样带随机选取 7 个样方,样方框大小为 30 cm×30 cm,记录样方内铜藻密度和株高。水深数据从潜水电脑表(MARES NEMO SPORT)上读取,并以崂山潮汐表中的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^[15]。调查站点用 GPS (Global Positioning System) 进行定位,并于 2012 年 5 月底,对已定位的 HN 站点铜藻繁殖阶段的分布生长情况进行了跟踪调查,调查方法同上。

1.3 人工藻苗海区移植实验及现场铜藻分布情况

2012 年 6 月 15 日在枸杞岛海区岩礁基质上采集铜藻雌株,生殖托上卵子已受精但未散放,带回实验室用砂滤海水冲洗后,移入水池中培养。待铜藻生殖托上幼孢子体具有附着能力时,用 100 μm 的滤布过滤经震荡脱落下来的铜藻幼孢子体,然后将收集到的幼孢子体均匀喷洒在 30 cm×40 cm×5 cm 的水泥板附着基上。在水温 22—24℃ 下,经充气培养 15 d 后,幼苗长到约 2 mm 高,每个水泥板上藻苗数量平均达到 32400 株。于 2012 年 7 月 5 日将附苗水泥板安装在 HN 站点的 3 组不同水深(240, 440, 640 cm)的支架上,支架预先在海区岩礁上钻孔固定好,每组水深安装 3 个附苗藻礁,30 d 后记录藻苗生长及存活情况。

为比较人工移植藻苗与自然岩礁基质上藻苗分布生长情况,于 8 月 5 日对 3 个不同水深组人工藻礁支架附近自然生长的铜藻幼苗进行了调查,每一水深组在人工移植藻礁附近随机选取 8 个 30 cm×30 cm 的样方框,记录铜藻密度和株高。

1.4 环境因子测量

环境因子测量在 2012 年 7 月 5 日到 8 月 5 日的实验期间内进行。在 HN 站点 3 个安装人工移植藻礁附近的岩礁基质上,随机选取表面平坦,坡度小于 10°的岩礁基质,将 30 cm×30 cm 样方框置于岩礁基质上,用 750 W 潜水泵抽吸样方框内沉积物,每一水深 3 个重复。泵的进水口用硬塑料管连接,塑料管

顶端用 3 mm 的单层滤网包住,防止大颗粒沙砾吸入造成泵损坏,吸出的沉积物装入水桶中。收集的沉积物样本带回实验室静止 24 h,记录沉积物在量筒中的体积,用于分析沉积物厚度对铜藻孢子体附着的影响,最后在 50℃ 下烘干 72 h 后称重^[9]。

在实验期间,用石膏块法分别测量了不同水深人工移植藻礁处的暴波强度,每次测量 24 h 后收回,共测 3 次。暴波强度代表了位点受波浪和水流运动影响的程度,通过计算石膏损失量得到位点暴波强度大小的相对值^[16],计算公式为:

$$EI = \frac{W_1 \times T_2}{W_2 \times T_1}$$

式中, EI 为暴波指数(无量纲), W_1 为现场放置石膏块的质量损失(g), W_2 为静水中放置石膏块的质量损失(g); T_1 为石膏块在现场放置的时间(h); T_2 为石膏块在静水中放置的时间(h)。

采用多功能水质仪(ALEC AAQ1183)测量 HN 站点 3 个人工移植藻礁处 240、440 cm 和 640 cm 水深的光照强度。实验期间选择晴天正午时段进行测量,共测量 8 次,用来比较不同水深光照强度的相对大小。

1.5 数据处理

文中数据使用 SPSS13.0 软件,采用单因素方差分析(ANOVA)比较组间差异显著性,以 $P < 0.05$ 表示组间差异显著,以 $P < 0.01$ 表示组间差异极显著,描述性统计值采用平均值±标准误(mean±SE)表示。

2 结果与分析

2.1 铜藻分布生长季节变化

铜藻幼苗时期水深分布范围在 130—547 cm 间,而成藻时期水深分布范围为 132—461 cm,在 HN 站点铜藻周年水深分布上限变化不明显,而分布下限则出现 86 cm 的上移。在潮间带低潮区(121—240 cm)和潮下带浅水区(241—360 cm)铜藻藻苗密度显著高于潮下带深水区(360 cm 以下)($P < 0.05$) (图 2),而在潮间带的中、高潮区(120 cm 以上)没有藻苗分布。在成藻时期 360 cm 以上的浅水区铜藻密度极显著高于深水区($P < 0.01$),尤其在水深大于 480 cm 时,没有发现成藻植株,密度损失率达到 100%。在 361—480 cm 水深内铜藻密度损失率最小,而在 121—240 cm 和 241—360 cm 两个水深组铜

藻密度损失率明显偏高,分别达到了 57.1% 和 71.1%。

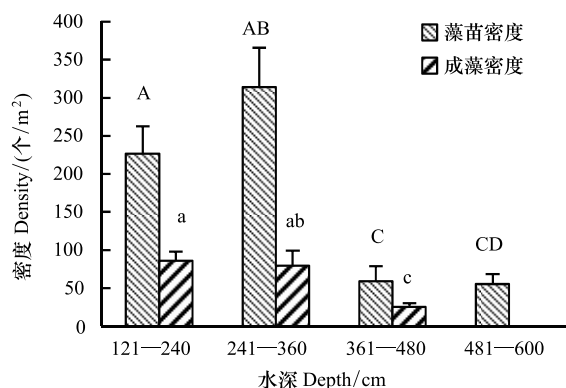


图2 不同水深铜藻幼苗和成藻的密度

Fig.2 Density of the germlings and adults of *S. horneri* at different depths

不同大写字母代表藻苗组间差异显著,不同小写字母代表成藻组间差异显著

随着水深的增加藻苗株高逐渐减小(图3),潮间带低潮区藻苗的株高极显著高于深水区($P < 0.01$)。成藻时期潮间带低潮区株高极显著高于潮下带区($P < 0.01$),潮间带低潮区铜藻生长速度最快,平均株高达到了(78.18 ± 1.64) cm。而潮下带 241—360 cm 和 361—480 cm 两个水深组铜藻生长相对缓慢,平均株高分别为(57.58 ± 1.63) cm 和(21.94 ± 1.42) cm。

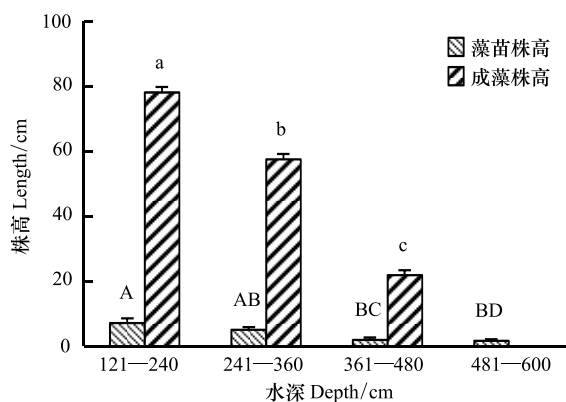


图3 不同水深铜藻幼苗和成藻的株高

Fig.3 Length of the germlings and adults of *S. horneri* at different depths

2.2 人工移植藻苗存活及自然海区铜藻分布情况

30 d 后潜水观察发现,随着水深的增加,人工移植的铜藻苗存活率显著下降。在 240 cm 水深藻苗密度虽然没有初始附着密度高,但分布均匀,藻体鲜

亮,平均株高达到 5 cm,布满附着基表面,覆盖率可达 95% 以上;在 440 cm 水深处藻礁上铜藻流失较多,3 个移植藻礁上的铜藻平均仅剩 14 株,覆盖率小于 5%,平均株高为 2 cm,藻体无光泽,并且藻礁表面被较多沉积物及附生生物覆盖;在 640 cm 水深处的藻礁上铜藻幼苗全部流失,实验过程中发现,藻礁上的铜藻幼苗在投放 7 d 后并没被较厚的沉积物覆盖,藻苗高度依然高于沉积物覆盖厚度,但藻苗生长缓慢,平均高度约 6 mm 左右,而 30 d 后,移植的藻礁表面被沉积物和大量的附生生物所覆盖,覆盖厚度达到 1 cm,当移除藻礁表面覆盖物后,铜藻幼苗已全部流失。

调查相同水深处自然岩礁上铜藻的分布情况时,也出现相似的减少趋势(图4),240 cm 和 440 cm 水深组间铜藻密度差异显著($P < 0.01$),而在 640 cm 水深处则没有铜藻分布。

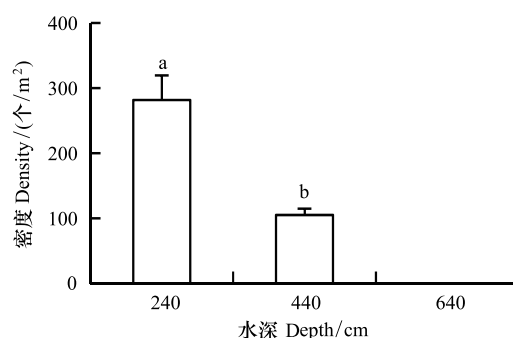


图4 不同水深岩礁上铜藻密度

Fig.4 Density of *S. horneri* at different depths on rocky reefs

2.3 不同水深环境因子测量结果

随着水深的增加,暴波强度显著降低($P < 0.01$) (图5),说明在深水区铜藻受波浪和水流作用影响程度减弱。而在岩礁基质上积累的沉积物数量则显

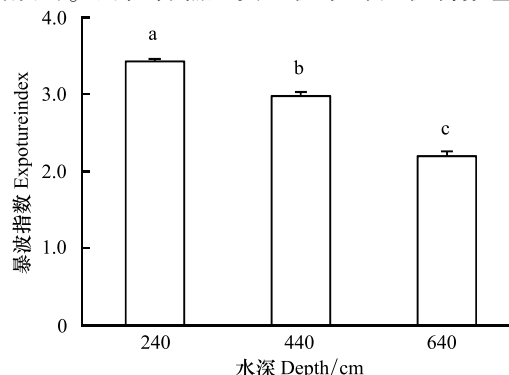


图5 不同水深的暴波指数

Fig.5 Exposure index at different depths

著增多 ($P < 0.01$), 在 240、440 cm 和 640 cm 3 个水深处沉积物厚度分别达到了 (0.24 ± 0.05) mm、 (0.78 ± 0.03) mm 和 (1.27 ± 0.16) mm, 对应的沉积物干重分别为 (3.65 ± 0.91) mg/cm²、 (12.63 ± 1.73) mg/cm² 和 (20.31 ± 2.71) mg/cm²。测得的光照强度值随水深增加逐渐减小 (图 6), 240 cm 水深光照强度显著高于其它两组水深 ($P < 0.01$)。

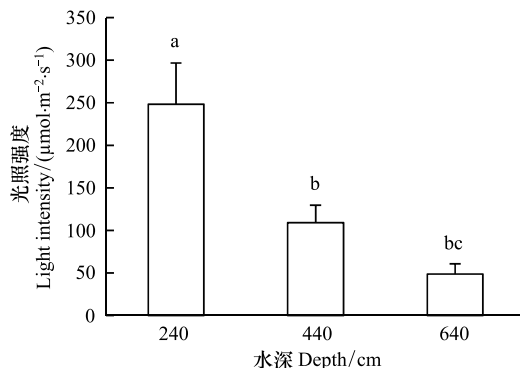


图 6 不同水深的光照强度
Fig.6 Light intensity at different depths

3 讨论

3.1 铜藻垂直分布变化

在铜藻的一个生长周期内, 分布水深上限没有出现明显的变化, 说明在暴波强度低的岩礁区附着基上由波浪产生的移除作用^[17], 并没有对铜藻分布水深上限产生严重的影响。由于在潮间带低潮区铜藻的快速生长决定了其在浅水区分布的统治优势, 平均 $248 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的光照强度为铜藻生长提供了有利条件, 而并未受到干出影响^[7]。对于分布在水深大于 460 cm 铜藻植株的消失, 并不是由波浪作用引起的。因为随着水深增加, 暴波强度减弱, 由波浪和水流作用形成的拖拽力对铜藻幼苗时期的移除作用效果明显减弱, 但沉积水平却显著增加, 光照强度也有所减弱。沉积物的增加在一定程度上可限制植食生物摄食的影响^[18], 因摄食作用导致的深水区铜藻流失的几率减小, 而研究期间并没有看到大量海胆和腹足动物出现, 植食动物对海藻摄食的影响不能成为影响铜藻分布的主要因素。因此, 光照和沉积物可能是影响铜藻低矮植株在深水区流失的主要原因。

张婧等^[19]研究了铜藻幼苗在 $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的光照强度下生长最好, 在高于 $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的强光

下, 由于藻苗的耐受力差, 苗体顶端分生组织较易溃烂。而本研究发现, 在 640 cm 水深的平均光照强度为 $48 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 本应适合藻苗生长, 但人工移植的铜藻幼苗却全部流失掉。沉积物的覆盖可能影响了藻苗的光照条件^[20], 但孙建璋等^[21]研究表明, 小于 $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的光照条件并不会导致铜藻幼苗死亡, 而仅影响了藻苗生长。相类似的研究结果也表明了, 由沉积物覆盖所引起的光照强度降低, 不影响幼苗存活而仅影响其生长^[22]。因此, 沉积物覆盖对移植铜藻幼苗存活产生的影响显得尤为突出。

已有研究证实了沉积物对海藻早期定居阶段的影响尤为重要^[9]。在深水区, 随着暴波强度的减弱, 沉积物更容易积累下来, 这种稳定的沉积环境可能更利于附生生物在移植藻礁上定居, 沉积物和附生生物在附着基上的积累及覆盖虽影响了藻苗的光照条件, 但光照降低可能并没有导致铜藻幼苗死亡, 较可能的原因是沉积物和附生生物的覆盖导致了铜藻幼苗因窒息而死亡^[23-24]。

3.2 铜藻垂直分布密度和生长变化

在成藻时期, 潮间带低潮区铜藻植株最高 (平均 78.18 cm), 孙建璋等^[21]研究了 70 cm 高成熟铜藻单植株怀卵量约 98 万个, 而 Kendrick^[25]研究了马尾藻幼孢子体散放后大多数 (98%) 附着在距离亲本 1 m 的直径范围内。由于在潮间带低潮区的暴波强度最高, 海藻幼孢子体在脱离生殖托后容易被波浪和水流冲离近岸附着基质^[26], 高暴波强度不利于海藻幼孢子体沉降下来, 仅一些附着粘度高的种类能快速粘附在浅水区附着基质上^[27]。尽管铜藻能够繁殖大量的补充群体, 但在暴波作用下并没有在潮间带低潮区形成广泛分布。而在水深大于 360 cm 处, 由于沉积物厚度增加, 铜藻幼孢子体的附着和生长均受到严重影响, 导致了铜藻分布密度最低。因此, 仅在 241—360 cm 水深范围内形成了适宜铜藻幼孢子体附着的有利条件, 产生了高密度分布带。

到了成藻阶段, 121—240 cm 水深范围内的铜藻密度损失率低于 241—360 cm 水深组, 潮间带低潮区的铜藻植株最高且处在较高的暴波强度作用下, 密度损失本应高于 241—360 cm 水深组, 但可能是受到密度制约机制影响^[12], 成藻阶段两个水深组平均密度都是 86 个/m²左右, 对于成藻来说这可能是较适合的生存密度。另外对于株高较矮的铜藻来

说,是否由于生长受到抑制引起假根发育不良,从而导致附着牢度差,造成较高的密度损失还需进一步研究加以证明。调查中发现潮下带深水区铜藻平均株高虽然仅 20 cm,在繁殖季节也能长出生殖托(潜水观察),但繁殖量明显偏低,这一结果与 Pang 等^[28]对铜藻进行室内培养的研究结果相一致。因此,潮间带低潮区分布的铜藻形成了繁殖的主要群体。这一结果说明了光照条件对铜藻生长起到重要作用,深水区分布的铜藻由于生长受到抑制,则更容易被沉积物覆盖而流失。

调查中测量的不同水深组光照强度是一个瞬时值,用来比较不同水深组间光照强度的相对大小,而在探讨光照强度对铜藻生长及存活影响时,这个测量值是不精确的,由于现场环境及潮位变化繁复,导致了在一个日照光周期内研究位点的光照强度不断变化,可能高于或低于现场测量的瞬时值,但这一瞬时值能够在一定程度上客观地反映铜藻幼苗时期处在一个较高的光照水平下,尤其是对于分布在潮间带低潮区的铜藻来说,可能有较长时间暴露在高于 $248 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的光照强度下。已有研究表明:铜藻在几毫米到几厘米幼苗阶段适宜生长及存活的光照强度范围是 $20\text{--}60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ^[19,21,28-29],这些研究都是在室内相对稳定的培养环境条件(稳定的光照强度、日照时长、水温、营养盐、水流等)下得到的结果。而在我们的研究中发现,自然分布在潮间带低潮区的铜藻以及人工移植到 240 cm 水深的铜藻幼苗,生长及存活都表现出显著的对高光照强度的适宜性,至少在较长时间的高光照强度下没有导致铜藻幼苗大量死亡,并最终在浅水区形成了铜藻的主要繁殖群体。孙建璋等^[30]对铜藻幼苗海区不同水层吊养实验结果证实了在小于 0.5 m 的浅水区铜藻生长最好。铜藻幼苗对高光照强度的适宜性可能与海水流速有关,高流速有利于海藻对营养盐和二氧化碳的摄入促进其生长^[31]。较高的水流运动条件是否促进了铜藻幼苗的生长代谢水平,进而提高了对光照强度的需求,或是在多种环境因子共同作用下产生了某种协同效应^[32],提高了铜藻幼苗对高光照强度的耐受力,以及铜藻幼苗对海区非恒定高光照强度下的适应机制等问题还需要进行深入研究,以查明其作用机理。

4 结论

在多种环境因子的限制作用下,导致了铜藻适宜分布的区域被局限在潮间带低潮区这一狭窄的分布带上,且形成了铜藻的主要繁殖群体。这一现象说明了在海区沉积物增多的影响下,铜藻的分布下限出现了上移。如果潮下带岩礁基质上沉积物数量减少,大型海藻场自然条件下的恢复是可预期的。

致谢:数据采集和处理得到了上海海洋大学赵静、周曦杰、沈天跃、王旭、梁金铃、赵旭、陈亮然等的帮助,特此致谢。

References:

- [1] Lüning K. Seaweeds: Their environment, Biogeography, and Ecophysiology. New York: Wiley, 1990: 278-278.
- [2] Airolidi L, Rindi F, Cinelli F. Structure, seasonal dynamics and reproductive phenology of a filamentous turf assemblage on a sediment influenced, rocky subtidal shore. *Botanica Marina*, 1995, 38(1/6): 227-237.
- [3] Kautsky H, van der Maarel E. Multivariate approaches to the variation in phytobenthic communities and environmental vectors in the Baltic Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 60: 169-184.
- [4] Santos R. A multivariate study of biotic and abiotic relationships in a subtidal algal stand. *Marine Ecology Progress Series*, 1993, 94: 181-190.
- [5] Vadas R L. Herbivory // Littler M M, Littler D S, eds. *Handbook of phycological methods. Ecological field methods: Macroalgae*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985: 531-572.
- [6] Kautsky H. Quantitative distribution of sublittoral plant and animal communities along the Baltic Sea gradient // Elftneriou A, ed. *Biology and Ecology of Shallow Coastal Waters*. Olsen: Fredensborg, 1993: 23-30.
- [7] Guo G L, Dong S L. Effects of desiccation on the growth and photosynthetic rate of four intertidal macroalgae from different vertical locations. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2008, (4): 78-84.
- [8] Zacharias M A, Roff J C. Explanations of patterns of intertidal diversity at regional scales. *Journal of Biogeography*, 2001, 28(4): 471-483.
- [9] Schiel D R, Wood S A, Dunmore R A, Taylor D I. Sediment on rocky intertidal reefs: Effects on early post-settlement stages of habitat-forming seaweeds. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, 331(2): 158-172.
- [10] Bäck S, Ruuskanen A. Distribution and maximum growth depth of

- Fucus vesiculosus* along the Gulf of Finland. Marine Biology, 2000, 136(2): 303-307.
- [11] Eriksson B K, Johansson G. Sedimentation reduces recruitment success of *Fucus vesiculosus* (Phaeophyceae) in the Baltic Sea. European Journal of Phycology, 2003, 38(3): 217-222.
- [12] White L F, Shurin J B. Density dependent effects of an exotic marine macroalga on native community diversity. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2011, 405(1/2): 111-119.
- [13] Lubchenco J, Gaines S D. A unified approach to marine plant-herbivore interactions. I. Populations and communities. Annual Review of Ecology and Systematics, 1981, 12: 405-437.
- [14] Tang X H, Wang F. Analyses on hydrographic structure in the Changjiang River estuary adjacent waters in summer and winter. Studia Marina Sinica, 2004, (46): 42-66.
- [15] Yang S R. How to use an electronic calculator to find tidal heights at arbitrary times and tidal hours at arbitrary heights between high and low water. Journal of Dalian Marine Transport Institute, 1981, (2): 31-36.
- [16] Terrados J, Duarte C M. Experimental evidence of reduced particle resuspension within a seagrass (*Posidonia oceanica* L.) meadow. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2000, 243(1): 45-53.
- [17] 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*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2007, 351(1/2): 129-142.
- [18] Kawamata S, Yoshimitsu S, Tanaka T, Igari T, Tokunaga S. Importance of sedimentation for survival of canopy-forming fucoid algae in urchin barrens. Journal of Sea Research, 2011, 66(2): 76-86.
- [19] Zhang J, Yan X H, Zhang S Y. Observations on embryology of zygotes and early development of juvenile sporophytes in *Sargassum horneri*. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(11): 1706-1716.
- [20] Chapman A S, Albrecht A S, Fletcher R L. Differential effects of sediments on survival and growth of *Fucus serratus* embryos (Fucales Phaeophyceae). Journal of Phycology, 2002, 38(5): 894-903.
- [21] Sun J Z, Zhuang D G, Chen W D, Zheng H Y, Lin L, Pang S J. Studies on sexual reproduction and seedling production of the brown alga *Sargassum horneri*. South China Fisheries Science, 2008, 4(2): 6-14.
- [22] Devlin J S, Volse L A. Effects of sediments on the development of *Macrocystis pyrifera* gametophytes. Marine Biology, 1978, 48(4): 343-348.
- [23] Airolidi L. The effects of sedimentation on rocky coast assemblages. Oceanography and Marine Biology, 2003, 41: 161-236.
- [24] D'Antonio C M. Role of sand in the domination of hard substrata by the intertidal alga *Rhodomela larix*. Marine Ecology Progress Series, 1986, 27: 263-275.
- [25] 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. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1995, 192(2): 273-288.
- [26] Gordon R, Brawley S H. Effects of water motion on propagule release from algae with complex life histories. Marine Biology, 2004, 145(1): 21-29.
- [27] 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'. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2003, 290(2): 229-245.
- [28] Pang S J, Liu F, Shan T F, Gao S Q, Zhang Z H. Cultivation of the brown alga *Sargassum horneri*: sexual reproduction and seedling production in tank culture under reduced solar irradiance in ambient temperature. Journal of Applied Phycology, 2009, 21(4): 413-422.
- [29] Choi H G, Lee K H, Yoo H I, Kang P J, Kim Y S, Nam K W. Physiological differences in the growth of *Sargassum horneri* between the germling and adult stages. Journal of Applied Phycology, 2008, 20(5): 729-735.
- [30] Sun J Z, Zhuang D G, Sun Q H, Pang S J. Artificial cultivation trials of *Sargassum horneri* at Nanji islands of China. South China Fisheries Science, 2009, 5(6): 41-46.
- [31] Hurd C L. Water motion, marine macroalgal physiology, and production. Journal of Phycology, 2000, 36(3): 453-472.
- [32] Wang H, Pang Y, Liu S B, Ma X. Research progress on influencing of environmental factors on the growth of submersed macrophytes. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3958-3968.

参考文献:

- [7] 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. 海洋湖沼通报, 2008, (4): 78-84.
- [14] 唐晓晖, 王凡. 长江口邻近海域夏、冬季水文特征分析. 海洋科学集刊, 2004, (46): 42-66.
- [15] 杨守仁. 用袖珍计算器求任意时潮高和任意潮高的潮时. 大连海运学院学报, 1981, (2): 31-36.
- [19] 张婧, 严兴洪, 章守宇. 铜藻受精卵的早期发生与幼孢子体发育观察. 水产学报, 2012, 36(11): 1706-1716.
- [21] 孙建璋, 庄定根, 陈万东, 郑海羽, 林力, 逢少军. 铜藻 *Sargassum horneri* 繁殖生物学及种苗培育研究. 南方水产, 2008, 4(2): 6-14.
- [30] 孙建璋, 庄定根, 孙庆海, 逢少军. 铜藻人工栽培的初步研究. 南方水产, 2009, 5(6): 41-46.
- [32] 王华, 逢勇, 刘申宝, 马璇. 沉水植物生长影响因子研究进展. 生态学报, 2008, 28(8): 3958-3968.