

沉积物对潮下带岩礁上铜藻早期定居阶段的影响*

毕远新 章守宇** 吴祖立

(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要 采用沉积物捕获器和抽吸泵测量不同站点和不同水深的沉积物相对数量,通过现场测量铜藻的分布密度,评估了枸杞岛潮下带铜藻分布与沉积水平和暴波强度的关系,并通过试验研究了不同沉积水平对铜藻幼孢子体附着和附着后藻苗存活的影响.结果表明:沉积物少且暴波强度小的站位铜藻分布密度最高,沉积物数量多、暴波强度高的站位铜藻分布稀少;在不同水深处,铜藻分布密度与沉积物数量呈负相关关系;附着基上沉积物数量干质量达到 $10.47 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ (0.543 mm 厚) 时,仅 4.4% 的铜藻幼孢子体能够附着,当沉积数量为 $13.96 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ (0.724 mm 厚) 时,则完全阻止幼孢子体附着;幼孢子体附着 1 周后,沉积物覆盖数量达到 $13.96 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,铜藻幼苗仍有 24.0% 存活,当沉积物覆盖数量达到 $34.9 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ (1.81 mm 厚) 时,铜藻幼苗全部死亡.总的来说,铜藻分布密度不但与沉积数量有关,在一定程度上还受暴波强度制约,沉积物对铜藻早期定居阶段的影响在铜藻种群分布上起到决定性作用.

关键词 大型海藻 附着 附着基 暴波

文章编号 1001-9332(2013)05-1439-07 **中图分类号** S931.1 **文献标识码** A

Effects of sediment on the early settlement stage of *Sargassum horneri* on rocky subtidal reefs. BI Yuan-xin, ZHANG Shou-yu, WU Zu-li (College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(5): 1439–1445.

Abstract: By using sediment trap and suction pump to measure the relative sediment levels across different sites and water depths, and through the in situ measurements of *Sargassum horneri* density, this paper assessed the relationships between the distribution of *S. horneri* and the sediment levels and wave exposure on the rocky subtidal platforms around Gouqi Island, China. The laboratory-based experiments were also conducted to test the effects of different sediment levels on the attachment of *S. horneri* zygote and the survival rate of *S. horneri* germling after the attachment. *S. horneri* predominated at the sites with lesser sediment and wave exposure, but less distributed in the sites with high level sediment and wave-exposure. At different water depths, the distribution of *S. horneri* was negatively correlated with the amount of sediment. A medium dusting (dry mass $10.47 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, approximate 0.543 mm deep) of sediment on the plate reduced the percentage of *S. horneri* zygotes attached to the substratum by 4.4%, and a heavy dusting (dry mass $13.96 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, approximate 0.724 mm deep) of sediment on the plate completely prevented the attachment. One week after the settlement of the zygotes, there were 24% of the germlings still survived when the dry mass sediment coverage was $13.96 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$. However, when the dry mass sediment coverage was up to $34.9 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ (approximate 1.81 mm deep), 100% of the germlings died. Overall, the distribution of *S. horneri* was not only related to sediment level, but also restricted by wave exposure to some extent. Sediment level was a critical factor affecting the distribution of *S. horneri*, particularly at its zygote attachment stage.

Key words: macroalgae; attachment; substratum; wave exposure.

* 国家海洋公益性行业科研专项(201005013-3)和国家自然科学基金项目(41176110)资助.

** 通讯作者. E-mail: syzhang@shou.edu.cn

2012-11-27 收稿, 2013-02-19 接受.

近年来,由于人类活动的影响,近岸岩礁区沉积物不断增加,导致近岸岩礁区系生物结构及多样性发生变化^[1-2],使不耐受沉积的物种逐渐消失^[3-4],而耐受沉积的物种得以生存并占据空间^[5-6]. 大型海藻是在岩礁基质上附着的重要生物类群,近岸岩礁区沉积物的增加无疑将对大型海藻种群结构及分布产生影响. 这种影响包括许多方面,如沉积物的运动摩擦造成藻体组织损坏或从附着基质上移除^[7],影响藻类的定居^[8]和已附着藻类的光照条件^[9];细颗粒沉积物可导致海藻早期生活阶段由于窒息而死亡^[10-11],使海藻的早期生活阶段对这些过程显得特别脆弱^[8]. 由于受到波浪^[1]、生物^[12]以及沉积物来源变化^[13]等共同作用,近岸海域岩礁基质上的沉积物数量随时间和空间发生巨大变化^[11],这种变化给定量研究沉积物对海藻的影响带来了困难. 近年来有关沉积物对海藻种群结构和分布变化影响的研究越来越多,但很少有文章能够明确沉积物如何影响海藻分布^[14-16]. 尽管沉积物对海藻分布产生的影响包括许多方面,而且可能共同作用影响海藻分布,但 这些影响对海藻分布产生的作用结果是不同的^[15,17],应该加以区分,以便明确沉积物影响海藻分布的作用机制. 本研究通过室内和现场试验,分析沉积物对铜藻早期附着阶段的影响,探讨其作用机理,阐明沉积物分布与铜藻分布的关系.

1 研究海域与研究方法

1.1 研究海域与样本采集

研究区位于枸杞岛海域(30°42′—30°44′N, 122°44′—122°48′E). 本研究选取 6 个站点(图 1),使用沉积物捕获器收集沉积物. J 型沉积物捕获器参照 Schiel 等^[1]的设计,采用 PVC 管制作,管内径 5.5 cm、长度 82 cm. 在每个站点岩礁上的同一水深

处(平均海平面以下 240 cm)水平安装沉积物捕获器. 为确保沉积物捕获器的稳定性,采用水下钻孔的方法固定 PVC 管. 沉积物采集时间为 2012 年 7 月 30 日至 8 月 13 日,共 14 d,兼顾一个大小潮周期. 收集到的沉积物样本带回实验室用 5 种不同目数的筛网过滤,用淡水冲洗除盐,分离出不同粒径的沉积物,然后在 50℃下烘干 72 h 后称量.

站点间的暴波强度采用石膏块法测量,通过计算石膏损失量得到各站点受波浪影响程度的相对值^[18],这种方法可有效兼顾波浪和水流共同作用的影响. 在收集沉积物期间,每一个站点随机测量 3 次,每次连续测量 24 h 后收回,石膏块安装位置与沉积物捕获器位置相同. 暴波强度指数(WE)计算公式为:

$$WE=M_1T_2/(M_2T_1)$$

式中: M_1 为现场放置石膏块的质量损失; M_2 为石膏块在静水中的质量损失; T_1 为石膏块在现场测量的时间; T_2 为石膏块在静水中放置的时间.

为了查清枸杞岛周围铜藻分布与沉积物数量、站点暴波程度的关系,记录 6 个布设沉积物捕获器附近岩礁基质上的铜藻分布密度,采用 SCUBA 潜水方法进行水下记录,采样日期在沉积物收集期间进行. 每一站点以布设的沉积物捕获器为参考点,平行于沿岸选取一个断面,在相同水深内随机选取 8 个样方记录铜藻密度,样方大小为 30 cm×30 cm.

为分析不同水深处沉积水平与铜藻分布的关系,选取 1 个暴波程度低、岩礁基质上沉积物数量波动相对稳定的站点(S_1)进行研究. 在 5 个水深处(平均海平面以下 240、340、440、540、640 cm)分别固定一个沉积物捕获器. 测量 5 个水深处的暴波强度,每个水深 3 次重复. 对 5 个水深的铜藻分布密度进行记录,在相同水深内随机选取 8 个样方,采样日期及方法同上.

为建立捕获器收集的沉积物数量与岩礁上实际积累的沉积物数量的对应关系,用潜水泵(750 W)直接抽吸岩礁基质上的沉积物. 在 S_1 站点 5 个水深的沉积物捕获器附近岩礁上,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,用泵抽吸样方内的全部沉积物. 泵的吸入口用硬塑料管连接,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. 每一水深在捕获器附近随机选取 3 个样方. 收集的沉积物样本带回实验室静止 24 h,移去上清液后转移到量筒中再静止 24 h,记录沉积

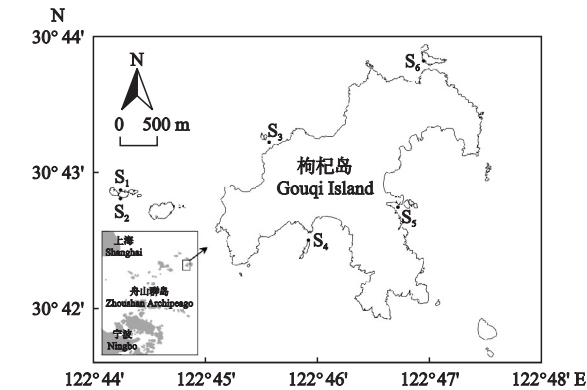


图 1 调查站点($S_1 \sim S_6$)位置
Fig. 1 Locations of the survey sites ($S_1 \sim S_6$).

物体积,然后用 5 种不同目数的筛网过滤,分离出 6 组粒径范围的沉积物,用淡水冲洗掉盐分,在 50 ℃ 下烘干 72 h 后称量。

1.2 沉积物对铜藻早期定居阶段影响的室内试验

在 S₁ 站点潜水采集不同水深的沉积物,带回实验室分析沉积物对铜藻幼孢子体附着和生长的影响。首先将采集回来的沉积物水溶液用 1 mm 孔径的滤网过滤掉大颗粒沙砾和杂物,然后于烧杯静止沉淀,24 h 后移除上清液,用移液枪将沉积物泥浆喷在预制好的 8 cm×8 cm×5 cm 小水泥块上,水泥块表面平坦且光滑,将泥浆均匀喷涂在水泥块表面,水泥块按沉积物喷涂量分为 5 组(0、1、2、3、4 mL),每组 4 个重复。将喷涂好的小块放在水池中(水池大小为 884 cm×78 cm×61 cm)缓慢注入过滤海水,待海水没过小块表面时停止注水,静止 24 h。用 100 μm 滤布收集室内培养的铜藻雌株生殖托上散放的幼孢子体,铜藻幼孢子体经显微镜观察大多数已经分裂到 64 个细胞以上,已经具备附着能力。用移液枪吸取铜藻幼孢子体溶液 1 mL 缓慢散放到每个小块表面,确保铜藻幼孢子体全部落在小块表面。每个小块散放的幼孢子体数基本相同,幼孢子体计数用显微镜在计数板上完成,平均每毫升为 1160 个。然后缓慢地将水池中注满水,3 d 后用海水缓慢冲掉水泥块表面沉积物,在显微镜下对已附着的铜藻幼孢子体计数。

将具有附着能力的铜藻幼孢子体溶液均匀地喷洒在水泥块上,7 d 后对已经萌发的铜藻幼孢子体(约 1 mm 高)在显微镜下计数,选出附着密度较均匀的水泥块(平均密度每 64 cm² 916 个),将泥浆均匀喷散在附着幼孢子体的水泥块上,泥浆喷洒量为 6 组(0、1、2、4、8、10 mL),每组 4 个重复。7 d 后用海水缓慢冲掉水泥块表面沉积物,在显微镜下对未死亡的幼苗进行计数。

1.3 数据处理

使用 SPSS 13.0 软件对试验数据进行单因素方差和 *T* 检验,并对影响因子进行相关性分析。差异显著性水平设为 α=0.05,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 站点间沉积水平与铜藻分布的关系

依据石膏块测量的站点暴波强度结果(图 2),可将站点分成暴波强度大(S₃、S₅、S₂)和小(S₁、S₆、S₄)两组,且两组间暴波强度差异显著(*P*<0.05)。高

暴波强度站点的沉积水平明显低于低暴波强度站点(图 3)。暴波强度小且相近的 3 个站点(S₁、S₆、S₄)沉积物数量存在较大差异,说明沉积水平不仅受暴波强度影响,还与站点的地理位置相关。

对于暴波强度较小的 S₁、S₆、S₄ 站点,表现为铜藻分布密度越高,收集到的沉积物数量越少,不同站点间铜藻分布数量差异显著(*P*<0.05)(图 2)。对于暴波强度较高的 S₃、S₅、S₂ 站点,则表现为铜藻分布密度越低,收集到的沉积物数量越少,说明暴波强度大既不利于沉积物在岩礁基质上积累,也不利于铜藻幼孢子体的附着及存活。因此,沉积物少且暴波强度低的站点更利于铜藻种群分布。

沉积物的粒径组成随站点暴波强度不同存在一定的变化(图 3),但均以小颗粒沉积物(0~30 μm)占主导,各站点小颗粒沉积物所占比例平均达到了 84.9%,说明主要是小颗粒沉积物对铜藻分布产生影响。

2.2 站点内沉积水平与铜藻分布的关系

在 S₁ 站点内,不同水深岩礁基质上的暴波强度

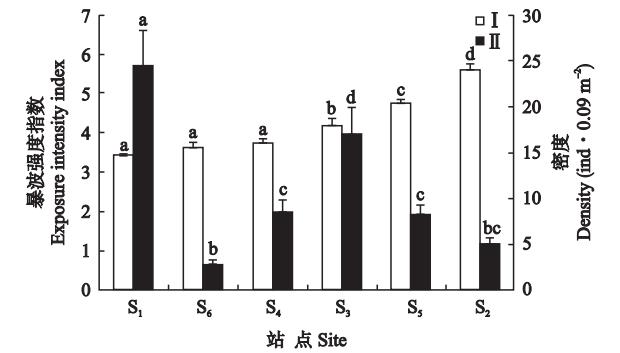


图 2 不同站点的暴波指数和铜藻密度
Fig. 2 Exposure index and density of *S. horneri* across sites.
I: 暴波强度指数 Exposure intensity index; II: 铜藻密度 Density of *S. horneri*. 不同小写字母表示处理间差异显著(*P*<0.05) Different small letters meant significant difference at 0.05 level among treatments. 下同 The same below.

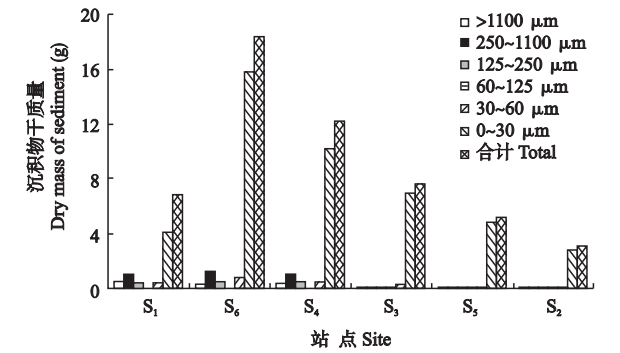


图 3 捕获器收集的不同站点沉积物粒径和干质量
Fig. 3 Sediment size and dry mass of fractions caught by the trap across sites.

差异显著($P<0.05$) (图 4). 随着水深增加, 暴波强度减弱, 捕获器收集到的沉积物数量也随之增多 (图 5), 沉积物数量与暴波强度存在显著负相关关系($r=-0.967$, $P=0.007$), 而铜藻分布密度则显著减少($P<0.05$) (图 4). 随着水深的增加, 沉积物粒径组成也发生变化, 大粒径($>125\ \mu\text{m}$) 沉积物随水深增加逐渐增多, 但小粒径($0\sim30\ \mu\text{m}$) 沉积物仍然占主导, 平均达到 59.7%.

为了描述沉积物捕捉器所采集到的沉积物数量与实际沉积在岩礁基质上沉积物数量之间的关系, 对两种采集方法收集到的沉积物数量进行对比 (图 5). 结果表明: 随着水深增加, 沉积在岩礁基质上的沉积物数量显著增加, 沉积物捕捉器采集到的沉积

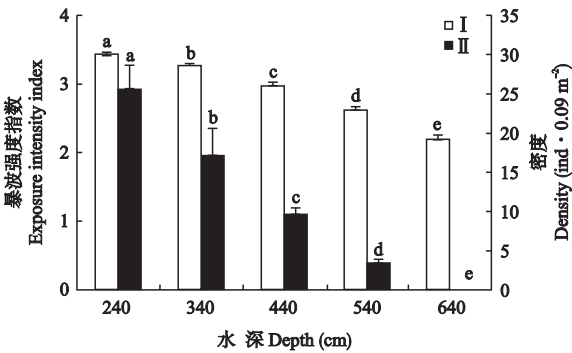


图 4 不同水深的暴波指数和铜藻密度
Fig. 4 Exposure index and density of *S. horneri* at different depths.

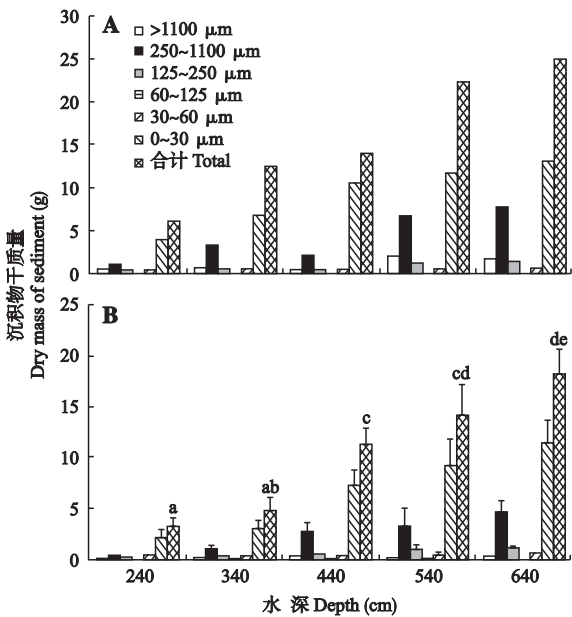


图 5 捕捉器收集 (A) 和用泵收集 (B) 的不同水深沉积物粒径和干质量
Fig. 5 Dry mass and the sediment size fractions caught by trap (A) and by the pump (B) at different depths.

物数量与岩礁基质上沉积物数量存在显著的正相关关系($r=0.756$, $P=0.001$). 岩礁上小颗粒沉积物平均所占比例为 64.4%, 与捕捉器采集到的沉积物粒径组成相似. 捕捉器所采集的沉积物与实际沉积到岩礁上的沉积物在粒径组成上相似, 在数量上存在正相关关系, 表明捕捉器采集的沉积物在一定程度上能客观反映现场实际的沉积状况.

2.3 沉积物对铜藻幼孢子体附着及藻苗存活影响的室内试验

在室内无外界干扰、不产生沉积物数量波动的条件下, 研究了沉积物对铜藻幼孢子体附着及附着后存活的影响. 从图 6 可以看出, 随着附着基质上沉积物数量增加, 铜藻幼孢子体附着率显著降低 ($P<0.05$). 当沉积物数量达到 $6.98\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时 (干质量, 下同. 平均厚度为 $0.362\ \text{mm}$), 铜藻幼孢子体附着率为 22.2%; 当沉积物数量为 $10.47\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时 ($0.543\ \text{mm}$ 厚), 铜藻幼孢子体附着率仅 4.4%; 而沉积物数量为 $13.96\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时 ($0.724\ \text{mm}$ 厚), 铜藻幼孢子体则无法附着. 这一结果说明沉积物对铜藻幼孢子体附着影响较大, 仅较薄的一层沉积物 ($0.7\ \text{mm}$ 厚) 就可导致铜藻幼孢子体无法附着. 由于试验水泥块附着表面微观上是凹凸不平的, 且喷

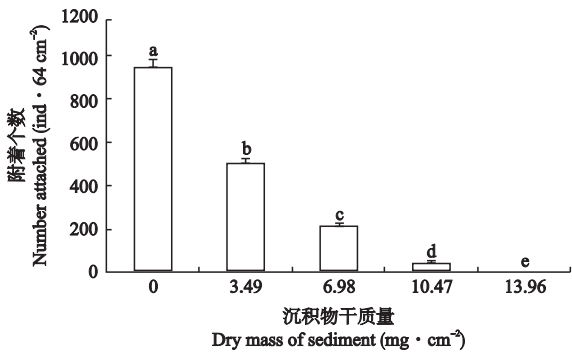


图 6 沉积物对幼孢子体附着的影响
Fig. 6 Effects of sediment on zygote attachment.

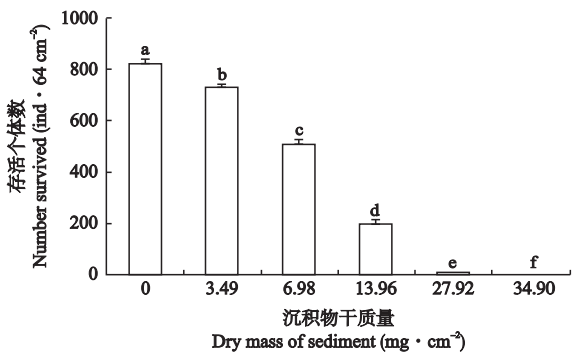


图 7 沉积物覆盖对藻苗存活的影响
Fig. 7 Effects of sediment cover on germling survival.

表 1 用泵采集的不同水深岩礁上沉积物厚度和干质量对应关系
Table 1 Correspondence between thickness and dry mass of sediment on rocky reefs collected by suction pump at different depths

项目 Item	水深 Depth (cm)				
	240	340	440	540	640
沉积物干质量 Sediment dry mass ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	3.65±0.91	5.35±1.44	12.63±1.73	15.82±3.28	20.31±2.71
沉积物厚度 Sediment thickness (mm)	0.24±0.05	0.36±0.06	0.78±0.03	0.98±0.19	1.27±0.16

涂在小块上的沉积物可能不十分均匀,因此对于较薄的沉积物厚度来说,幼孢子体附着率试验结果可能偏高,实际上可能低于 0.7 mm 的沉积物厚度就可能导致铜藻幼孢子体无法附着. 沉积物覆盖量达到 $13.96 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时(0.724 mm 厚),铜藻幼苗仍有 24.0% 存活,只有当沉积物覆盖数量达到 $34.9 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时(1.81 mm 厚),铜藻幼苗全部死亡(图 7). 说明沉积物覆盖对已附着的铜藻幼苗的影响小于对铜藻附着阶段的幼孢子体的影响.

对比室内沉积物试验结果与现场采集的沉积物结果,可以看出:在 S_1 站点水深 340 cm 岩礁上采集到的沉积物数量为 $5.35 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ (平均厚度为 0.36 mm),与室内试验相比,至少有 78% 的铜藻幼孢子体无法附着. 随水深增加,沉积物数量逐渐增加(表 1),当水深达到 440 cm 时,岩礁上采集到的沉积物数量为 $12.63 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ (0.78 mm 厚),这一沉积物厚度水平导致铜藻幼孢子体完全不能附着. 岩礁基质上实际还存在少部分较粘性的沉积物可能无法被抽吸上来,现场岩礁基质上沉积物的实际数量可能更高,因此,适宜铜藻幼孢子体附着的分布水深可能小于 440 cm. 如果不考虑岩礁上沉积数量随时间和空间的变化,以及岩礁附着基质的结构多样性,依据现场采集到的沉积物数量结果,可以说铜藻的实际分布情况与沉积物数量的分布情况是相对应的,因为在 540 cm 水深处铜藻已经很稀少了,640 cm 处则没有发现铜藻植株. 因此,无论是在铜藻幼孢子体附着时期还是在附着后的存活阶段,沉积物的影响均不容忽视.

3 讨 论

由于沉积物的沉积方式和运动随时间和空间不断发生变化^[19],以及受水动力条件^[20]、水下地形结构^[21]、生物间竞争^[6]等因素的共同影响,沉积在岩礁上的沉积物数量及分布不断发生变化. 在短时间内现场所采集沉积物数量,可能无法代表铜藻一个繁殖周期内的沉积物整体沉积状况,但能在一定程

度上反映沉积物的变化趋势^[10]. 可能正是由于沉积物的沉积状况不断随时空变化而改变,虽然目前铜藻种群数量趋于减少,但海区不断增加的沉积物并没有导致铜藻种群消失.

铜藻的分布特征与暴波强度和沉积物数量具有一定的相关性,这种相关性有利于人们从时空变动的角度去分析铜藻实际的分布特征. S_2 站点暴波强度最高,收集到的沉积物数量最少,铜藻分布密度最低,说明暴波强度高的站点沉积物很难在岩礁基质上沉积下来,更多为悬浮沉积物,因此沉积物覆盖对铜藻幼孢子体附着和藻苗存活的影响可能不是导致暴波站点铜藻分布密度低的主要因素. 暴波强度高对铜藻附着生长产生许多其他不利影响,高暴波强度不利于幼孢子体沉降,仅一些附着粘度高的种类能快速粘附在基质上^[22],高暴波强度还可导致散放的幼孢子体飘离近岸岩礁附着基^[23],在远离近岸的岩礁上沉积物数量增多,以及不利的光照条件都将影响幼孢子体的附着与存活^[24],高暴波强度还能引起藻体断裂或将藻体从附着基质上移除^[25],沉积物再悬浮造成的海水浊度增加对海藻幼孢子体附着也会产生不利影响^[26]. 对于暴波强度小、沉积物水平高的 S_0 站点来说,由于水体平静,沉积物更容易沉积下来,这无疑影响了铜藻的分布. 由于小颗粒沉积物在粒径组成上占主导,可能阻碍铜藻幼孢子体接触岩礁基质,或由于被长时间掩埋而窒息死亡. 在相近暴波强度的 S_1 站点,沉积物数量最少,铜藻密度高,也证明了沉积物对铜藻分布具有重要影响. 随着水深的增加,沉积物粒径组成逐渐加大,由于深水区沉积物的沉积状态相对稳定,通过摩擦作用影响铜藻的可能性较小,可能更多地导致铜藻幼孢子体无法直接接触到附着基,以及长时间被掩埋的影响. 因此,铜藻垂直分布上移的现象与不同水深处的沉积水平是相关的,而光照条件可能不是主要因素. 已有研究表明,沉积物对海藻幼孢子体覆盖产生的光照强度降低,不影响孢子体存活而仅影响其生长^[9]. 因此沉积物随水深增加而增多的分布特点将导致铜

藻垂直分布上移。

铜藻多为一年生、有性繁殖占主导(95%), 70 cm成熟单植株卵量约98万个^[27], 如此大的卵量并没有形成广泛的种群分布, 室内试验结果证明了沉积物影响铜藻幼孢子体附着及附着后的存活。幼孢子体附着和附着后这一时期需要稳定的附着基质定居, 而且沉积物对幼孢子体附着和附着后成活阶段产生的影响远大于成藻阶段^[28-29], 因此, 岩礁上的沉积物对铜藻早期定居阶段将产生严重影响。一方面是沉积物阻碍了铜藻幼孢子体附着并被掩埋而窒息死亡, 另一方面是耐受沉积藻类大量繁殖占据附着空间^[30], 导致铜藻没有可附着的空间, 种群数量减少。如果在铜藻短暂的繁殖期内, 沉积物数量发生波动, 产生仅1 mm厚度的增加且持续一段时间, 铜藻种群数量将急剧下降, 因此沉积物的长期作用将对岩礁基质上生物的集群结构产生重要影响^[31]。在沉积物影响下, 无性繁殖比有性繁殖植株更能适应这种干扰^[32], 最后可能只有小部分无性繁殖的铜藻植株能存活下来, 这或许也是铜藻在不断增多的沉积物影响下没有完全消失的另一原因。

站点的沉积水平与暴波强度和地理位置相关。在暴波强度相近的 S_1 、 S_6 和 S_4 站点, 由于 S_1 站点远离人为因素影响, 沉积物排放相对少, 而 S_6 和 S_4 站点离居住区较近, 各种生活废水及加工污水在这一区域排放较多, 导致这两个站点的沉积物较多。沉积物分布的水平差异可能导致铜藻在近岸岩礁上分布的不连续性, 在站点尺度上形成斑块状分布。对于某一站点而言, 在水深较浅的岩礁上沉积物数量波动较大, 受波浪和潮汐作用影响, 沉积物很难在岩礁上长时间停留, 尤其是在表面结构复杂且有凸起的岩礁上^[33]。水平岩礁上会比有一定坡度的岩礁积聚更多的沉积物^[21], 如果不考虑沉积物覆盖的影响, 水平附着基比有坡度的附着基更利于海藻孢子附着^[26]。由于结构复杂的岩礁受沉积物影响的程度相对较小, 为铜藻附着及生长提供了有利空间, 铜藻在其上的分布和生长具有明显优势(笔者潜水观察)。深水区岩礁上沉积物数量增多, 且受到的波浪和水流影响相对较小, 沉积状态相对稳定, 即使是结构复杂的岩礁基质也难免会被沉积物覆盖, 由于被较厚的沉积物覆盖且作用时间较长, 铜藻幼孢子体很难在此区域附着及存活。另外岩礁上的各种生物(如贻贝^[34]、附着无脊椎动物^[35]、低矮的藻类^[30])可积累围困住一定数量的沉积物, 改变沉积物的分布格局, 铜藻在这种沉积物大量堆积的区域更加无法附

着。因此, 沉积物在岩礁基质上的时空分布格局及数量决定了铜藻的分布特征, 尤其其对铜藻早期定居阶段的重要影响, 可能是造成小尺度范围内铜藻斑块状分布的决定性因素。

4 结 论

沉积物对铜藻早期定居阶段的影响对铜藻分布具有重要作用, 尤其是在幼孢子体附着阶段。尽管近岸岩礁上沉积水平随时间和空间不断发生变化, 但铜藻的早期定居阶段一旦被较厚的沉积物影响且持续一段时间, 将会导致铜藻数量锐减。沉积物较可能的作用机制是细颗粒沉积物阻碍幼孢子体接触附着基, 以及沉积物覆盖导致幼苗窒息而死亡。沉积物在近岸岩礁区的增加改变了铜藻的分布格局, 尤其是在较隐蔽且利于沉积物积累的位点对铜藻分布影响最严重, 而在暴波强度高的站位, 铜藻分布则受多种不利条件限制。因此, 铜藻集中分布在沉积物数量少且暴波强度不高的位点。

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、陈亮然等的大力帮助, 在此表示感谢!

参考文献

- [1] Schiel DR, Wood SA, Dunmore RA, *et al.* Sediment on rocky intertidal reefs: Effects on early post-settlement stages of habitat-forming seaweeds. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, **331**: 158-172
- [2] Balata D, Piazzzi L, Cinelli F. Increase of sedimentation in a subtidal system: Effects on the structure and diversity of macroalgal assemblages. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, **351**: 73-82
- [3] White AT, Vogt HP, Arin T. Philippine coral reefs under threat: The economic losses caused by reef destruction. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, **40**: 598-605
- [4] Terawaki T, Yoshikawa K, Yoshida G, *et al.* Ecology and restoration techniques for *Sargassum* beds in the Seto Inland Sea, Japan. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, **47**: 198-201
- [5] Airolidi L. Roles of disturbance, sediment stress, and substratum retention on spatial dominance in algal turf. *Ecology*, 1998, **79**: 2759-2770
- [6] Airolidi L. Effects of disturbance, life histories, and overgrowth on coexistence of algal crusts and turfs. *Ecology*, 2000, **81**: 798-814
- [7] Kennelly SJ. Effects of kelp canopies on understory species due to shade and scour. *Marine Ecology Progress Series*, 1989, **50**: 215-224
- [8] Vadas RL, Johnson S, Norton TA. Recruitment and mortality of early post-settlement stages of benthic algae. *British Phycological Journal*, 1992, **27**: 331-351
- [9] Devlinny JS, Volse LA. Effects of sediments on the de-

- velopment of *Macrocystis pyrifera* gametophytes. *Marine Biology*, 1978, **48**: 343–348
- [10] Airoidi L. The effects of sedimentation on rocky coast assemblages. *Oceanography and Marine Biology*, 2003, **41**: 161–236
- [11] D'Antonio CM. Role of sand in the domination of hard substrata by the intertidal alga *Rhodomela larix*. *Marine Ecology Progress Series*, 1986, **27**: 263–275
- [12] Piazzì L, Balata D, Ceccherelli C, *et al.* Interactive effect of sedimentation and *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* invasion on macroalgal assemblages in the Mediterranean Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **64**: 467–474
- [13] Fornos JJ, Forteza V, Jaume C, *et al.* Present-day *Halimeda* carbonate sediments in temperate Mediterranean embayments: Fornels, Balearic Islands. *Sedimentary Geology*, 1992, **75**: 283–293
- [14] Marshall DJ, McQuaid CD. The influence of respiratory responses on the tolerance to sand inundation of the limpets *Patella granularis* L. (Prosobranchia) and *Siphonaria capensis* Q. et G. (Pulmonata). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1989, **128**: 191–201
- [15] Kendrick GA. Recruitment of coralline crusts and filamentous turf algae in the Galapagos archipelago: Effect of simulated scour, erosion and accretion. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1991, **147**: 47–63
- [16] Chapman AS, Fletcher RL. Differential effects of sediments on survival and growth of *Fucus serratus* embryos (Fucales, Phaeophyceae). *Journal of Phycology*, 2002, **38**: 894–903
- [17] Taylor PR, Littler MM. The roles of compensatory mortality, physical disturbance, and substrate retention in the development and organisation of a sand-influenced, rocky-intertidal community. *Ecology*, 1982, **63**: 135–146
- [18] Terrados J, Duarte CM. Experimental evidence of reduced particle resuspension within a seagrass (*Posidonia oceanica* L.) meadow. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, **243**: 45–53
- [19] Airoidi L, Cinelli F. Variability of fluxes of particulate material in a submarine cave with chemolithoautotrophic inputs of organic carbon. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, **139**: 205–217
- [20] Desguée R, Robin N, Gluard L, *et al.* Contribution of hydrodynamic conditions during shallow water stages to the sediment balance on a tidal flat: Mont-Saint-Michel Bay, Normandy, France. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, **94**: 343–354
- [21] Whorff JS, Whorff LL, Sweet MH. Spatial variation in an algal turf community with respect to substratum slope and wave height. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1995, **75**: 429–444
- [22] Taylor DI, Schiel DR. 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**: 229–245
- [23] Gordon R, Brawley SH. Effects of water motion on propagule release from algae with complex life histories. *Marine Biology*, 2004, **145**: 21–29
- [24] Henley WF, Patterson MA, Neves RJ, *et al.* Effects of sedimentation and turbidity on lotic food webs: A concise review for natural resource managers. *Reviews in Fisheries Science*, 2000, **8**: 125–139
- [25] Zacharias MA, Roff JC. Explanations of patterns of intertidal diversity at regional scales. *Journal of Biogeography*, 2001, **28**: 471–483
- [26] Chen Y (陈勇), Shao L-P (邵丽萍), Zheng X-X (郑晓贤), *et al.* The influence of spore concentration, attachment gradient and turbidity of sea water on attachment density of spores in sea mustard *Undaria pinnatifida*. *Journal of Dalian Fisheries University* (大连海洋大学学报), 2008, **23**(3): 192–195 (in Chinese)
- [27] Sun J-Z (孙建璋), Zhuang D-G (庄定根), Chen W-D (陈万东), *et al.* Studies on sexual reproduction and seedling production of the brown alga *Sargassum horneri*. *South China Fisheries Science* (南方水产), 2008, **4**(2): 6–14 (in Chinese)
- [28] Santos R. A multivariate study of biotic and abiotic relationships in a subtidal algal stand. *Marine Ecology Progress Series*, 1993, **94**: 181–190
- [29] Vogt H, Schramm W. Conspicuous decline of *Fucus* in Kiel Bay (Western Baltic): What are the causes? *Marine Ecology Progress Series*, 1991, **69**: 189–194
- [30] Airoidi L, Virgilio M. Responses of turf-forming algae to spatial variations in the deposition of sediments. *Marine Ecology Progress Series*, 1998, **165**: 271–282
- [31] Shaffer JA, Parks DS. Seasonal variations in and observations of landslide impacts on the algal composition of a Puget Sound nearshore kelp forest. *Botanica Marina*, 1994, **37**: 315–323
- [32] Airoidi L. Responses of algae with different life histories to temporal and spatial variability of disturbance in subtidal reefs. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, **195**: 81–92
- [33] Trowbridge CD. Demography and phenology of the intertidal green alga *Codium setchellii*: The enigma of local scarcity on sand-influenced rocky shores. *Marine Biology*, 1996, **127**: 341–351
- [34] Albrecht AS. Soft bottom versus hard rock: Community ecology of macroalgae on intertidal mussel beds in the Wadden Sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, **229**: 85–109
- [35] Palmer-Zwahlen ML, Aseltine DA. Successional development of the turf community on a quarry rock artificial reef. *Bulletin of Marine Science*, 1994, **55**: 902–923

作者简介 毕远新,男,1975年生,博士研究生.主要从事海洋生态系统工程、大型海藻生态修复研究. E-mail: byx369@163.com

责任编辑 肖红