



枸杞岛海藻场两种大型海藻碎屑分解和沉降特征

夏艳芳^{1,2}, 章守宇^{1,2*}, 王凯^{1,2}, 徐鹏^{1,2}, 李娜^{1,2}, 李训猛^{1,2}

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 海洋牧场工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 岛礁水域海藻场是近岸海域典型的生态系统, 大型海藻分解产生的碎屑是海藻场生态功能的重要基础。为探究大型海藻碎屑对海藻场生态功能潜在规模的贡献, 本研究以枸杞岛海藻场孔石莼和舌状蜈蚣藻为对象, 通过现场挂袋实验和室内静水沉降测试, 分析了两种海藻碎屑的组分、粒径和沉降特征。结果显示, 分解过程中舌状蜈蚣藻和孔石莼的碎屑密度均逐渐减小, 且各自在不同分解时期无显著差异。舌状蜈蚣藻碎屑中有机 C 含量和有机 N 含量对密度变化影响不显著, 孔石莼碎屑中有机 C 含量对密度没有显著影响, 而有机 N 含量对密度有显著影响。孔石莼碎屑的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 对其密度有显著影响, 舌状蜈蚣藻碎屑的密度只受 $\delta^{13}\text{C}$ 影响。两种海藻碎屑的密度都受木质素含量的显著影响, 受纤维素含量的影响不显著。粒径是两种海藻碎屑沉降速度的决定性要素之一, 研究表明, 舌状蜈蚣藻大型碎屑 (粒径 $>0.830\text{ mm}$)、中型碎屑 ($0.380\sim 0.830\text{ mm}$) 和小型碎屑 ($0.180\sim 0.380\text{ mm}$) 的沉降速度分别为 $0.016\sim 0.023$ 、 $0.008\sim 0.015$ 和 $0.004\sim 0.005\text{ m/s}$, 孔石莼碎屑相应的沉降速度分别为 $0.011\sim 0.014$ 、 $0.005\sim 0.006$ 和 $0\sim 0.003\text{ m/s}$ 。本研究为探寻大型海藻碎屑特征和海藻场的生态辐射范围提供了参考依据。

关键词: 舌状蜈蚣藻; 孔石莼; 碎屑; 沉降特征; 粒径; 密度; 枸杞岛

中图分类号: S 932.7

文献标志码: A

岛礁海域的鱼类等生物资源量和种类多样性显著高于周边海域, 一些岛礁海域近岸水域的底栖动物和鱼类群落的种类多样性、丰度、密度等指数甚至达到了外围海域的 3 倍以上^[1-3], 这与岛礁近岸岩礁地带大型海藻场的栖息地作用以及大型海藻破碎或凋零碎屑的营养供给等密切相关^[4-6]。大型海藻作为典型的岛礁近岸水生植物, 其 90% 以上的能量以碎屑的形式进入食物链, 为岛礁海域生物资源的养护与产出提供着极其重要的能量基础^[7]。大型海藻碎屑受粒径大小和海流等因素影响, 其在岛礁海域呈非均匀分布。海藻场大型

海藻的碎屑可被输运到数十米至数百千米的距离, 通常粒径较大的海藻碎屑沉降在海藻场内, 粒径较小的海藻碎屑随海流被输运到邻近的海域或深海, 并促进沉积海域的二次生产^[8-12]。吴程宏等^[13]研究发现, 枸杞岛海藻场在凋亡期 (7 月), 大型海藻对沉积有机物 (SOM) 的平均贡献率最高可达 53.71%。巨藻产生的碎屑能够跨越超过 14 km 的海域范围, 为碎屑沉积海域的潮间带和潮下带滤食性底栖生物提供了食源^[14-15]。

大型海藻分解受海水理化性质等因素的影响, 刘雨蒙等^[16]对枸杞岛海藻场舌状蜈蚣藻 (*Grate-*

收稿日期: 2021-04-29 修回日期: 2021-06-07

资助项目: 国家自然科学基金 (41876191); 现代农业产业技术体系专项 (CARS-50); 上海海洋大学科技发展专项 (A2-2006-20-200207)

第一作者: 夏艳芳 (照片), 从事海藻场生态学研究, E-mail: 18437959268@163.com

通信作者: 章守宇, 从事海洋牧场及海藻场生态学研究, E-mail: syzhang@shou.edu.cn



loupia livida)、孔石莼 (*Ulva lactuca*) 和瓦氏马尾藻 (*Sargassum vachellianum*) 等优势藻种的分解过程及组分变化进行了研究, 并依据主要理化因素将分解过程分为分解前期 (淋溶期 0~11 d) 和分解后期 (微生物分解期 11~42 d)。邹敏等^[17] 研究发现上述相同海域瓦氏马尾藻的实验室最适分解温度为 25.15 °C。Wernberg 等^[18] 研究了挪威北部海域海带的 8 种不同大小和不同部位的碎屑沉降速度。

有关大型海藻碎屑分解过程中的碎屑粒径、组织成分和沉降特性相关的研究至今鲜有报道。本研究拟通过大型海藻现场挂袋分解实验, 对其产生碎屑的粒径组成和成分进行检测, 分析枸杞岛海藻场舌状蜈蚣藻和孔石莼两种大型海藻碎屑的组分变化和沉降特性, 为探究海藻场的生态辐射范围和海藻碎屑迁移输运动力模型构建提供参考。

1 材料与方法

1.1 室外挂袋实验

室外挂袋实验是还原藻体在自然海域受到水动力、环境因子和生物因素的作用而分解产生碎屑的过程。挂袋实验地点为浙江枸杞岛庙干码头 (30°47'10.24"N, 122°43'22.29"E), 外部无贻贝养殖区, 属于自然开阔海域。挂袋时间为 2020 年 7 月 18 日, 现场采集枸杞岛海藻场夏季大型海藻优势种孔石莼和舌状蜈蚣藻, 将藻类植株放入做好标记的筛绢网袋 (120 目), 用尼龙绳固定, 放入海中, 网袋中的藻体在海流冲击和水环境因素共同影响下分解产生碎屑, 分别于新鲜藻体挂袋后 5、11、16、23、30 和 37 d 进行分析, 并设定第 5、11、16、23、30 和 37 天分别为分解的第 1、2、3、4、5 和 6 时期, 筛绢袋中的藻体分解完全, 视为分解结束。

1.2 室内静水沉降实验

基于室外挂袋实验自然分解过程产生的碎屑, 通过室内静水沉降实验, 只考虑碎屑自身特性对垂向速度的影响, 探究碎屑沉降特征。室内静水沉降实验的沉降装置为 D(直径)=0.4 m、H(高度)=1.5 m 和 D=5 cm、H=40 cm 的透明亚克力沉降筒, 筒身标有刻度。通过室内沉降筒测量室外挂袋实验收集的海藻碎屑在 24 h 之内的沉降速度, 速度大小通过沉降距离与时间计算。通过足够数量的碎屑沉降和同一碎屑进行反复沉降, 以确保沉降速度的一致性并消除变异性。

1.3 海藻碎屑粒径、生物量、密度和分解率

大型海藻碎屑不同时期的粒径和生物量

为了测量颗粒面积和质量, 所有碎屑放置在浅色背景坐标纸上, 使用 Image-J 1.8.0 软件测量面积 (A), 使用电子天平称量碎屑的湿重。

分解率和密度计算公式:

$$M(\%) = (m - m') / m \times 100\%$$

$$\rho = m / V$$

式中, M 为碎屑的分解率 (%), m 为碎屑初始重量 (g), m' 为剩下碎屑的重量 (g), ρ 为碎屑的密度 (g/cm³), V 为碎屑的体积 (cm³)。

1.4 化学分析实验

碳氮稳定同位素分析 海藻碎屑样品经去离子水清洗后, 用 1 mol/L 的 HCl 酸化处理以去除有机杂质, 置于 -55 °C 真空条件下冷冻干燥 24 h, 使用混合型球磨机 (Retsch MM440) 粉碎样品。采用元素分析仪-稳定同位素质谱仪联机 (FlashEA1112HT-DeltaVAdvantages, Thermo 公司) 测定海藻碎屑样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值及有机 C、N 含量。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值计算公式:

$$\delta X(\text{‰}) = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000\text{‰}$$

式中, X 为 ^{13}C 或 ^{15}N , R 为 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 。

木质素和纤维素质量百分比分析 将海藻碎屑用苯-乙醇法抽提, 于水浴中索氏抽提完全, 风干后备用。用苯-乙醇索氏抽提试样以去除树脂和色素, 再用 72% 的浓硫酸和 4% 的稀硫酸 2 步水解试样, 使木质素和纤维素中的组分解成易定量的物质。其中, 纤维素水解生成单糖, 采用 LC-20AT 高效液相色谱仪 (日本岛津), 使用高效液相色谱法进行定量, 木质素采用灼烧法和紫外分光光度法测定。

$$W_1(\%) = (C_{\text{glu}} \times 87 \times 10^{-3} \times L \times 0.90) / m_0 \times 100\%$$

$$W_2(\%) = (m_1 - m_2) / m_0 \times 100\%$$

式中, W_1 为纤维素质量百分比 (%), W_2 为木质素质量百分比 (%); C_{glu} 为葡萄糖浓度 (g/L); L 为纤维素水解液的体积 (L); m_0 为用于检测的样品质量 (g), m_1 为残渣和坩埚烘干质量 (g), m_2 为残渣灰化和坩埚总质量 (g)。

1.5 数据分析

使用 SPSS 19.0 软件进行数据分析, 使用 Origin 2018 软件制图。密度数据的差异性检验使

用独立样本 t 检验; 沉降速率、组分分析采用单因素方差分析 One-Way ANOVA 检验, $P < 0.05$ 判定为差异显著。

2 结果

2.1 碎屑密度和粒径在分解过程中的变化

分解过程中, 舌状蜈蚣藻和孔石莼 2 种海藻的碎屑密度均呈下降趋势, 两个藻种间密度存在显著差异 ($P < 0.05$), 舌状蜈蚣藻和孔石莼不同分解时期密度变化不显著 ($P > 0.05$) (图 1)。

2.2 不同粒径的碎屑沉降速度

海藻碎屑沉降速度随着碎屑面积的增大而增大, 依据 2 种碎屑沉降速度发生突变时的“临界粒径”, 将碎屑分为大型碎片 (>0.830 mm)、中型碎片 ($0.380\sim 0.830$ mm) 及小型碎片 ($0.180\sim 0.380$ mm) 3 个级别。舌状蜈蚣藻 3 个级别的碎屑沉降速度分别为 $0.016\sim 0.023$ 、 $0.008\sim 0.015$ 和 $0.004\sim 0.005$ m/s, 且 3 个级别粒径的碎屑沉降速度与初始沉降速度在不同时期也存在差异 ($P < 0.05$), 舌状蜈蚣藻大型碎屑在 30 d 后的沉降速度相对初始沉降速度差异显著 ($P < 0.05$), 中型碎片在 37 d 差异显著 ($P < 0.05$), 小型碎片在整个分解过程中沉降速度不发生变化 ($P > 0.05$), 整个分解过程中舌状蜈蚣藻的碎屑粒径沉降阈值为 0.180 mm, 并且阈值没有受到分解过程的影响 (表 1)。孔石莼 3 个级别碎屑的沉降速度分别为 $0.011\sim 0.014$ 、 $0.005\sim 0.006$ 和 $0\sim 0.003$ m/s, 随着不断地分解, 孔石莼的沉降阈值发生变化, 在分解到第 30 天时, 沉降阈值由 0.180 增至 0.380 mm, 沉降速度只有小型碎片与初始沉降速度差异显著 ($P < 0.05$) (表 2)。

2.3 大型海藻碎屑组分变化

组分分析表明, 两种海藻碎屑的有机 C 和 N 含量、C/N、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、木质素含量和纤维素含量存在差异 (图 2)。两种大型海藻碎屑在分解过程中有机 C、N 含量呈现出不同的变化趋势, 舌状蜈蚣藻在分解约 10 d 时, 有机 C 含量达到最高值后平缓下降至较低值, 孔石莼有机 C 含量在分解 5 d 达到最高值之后缓慢下降, 但较初始值高 (图 2-a)。舌状蜈蚣藻中的海藻沉降物中, 有机 N 含量在分解 15 d 时下降最快, 之后变化相对较小。孔石莼的有机 N 含量较鲜藻时期, 一直处于上升趋势 (图 2-b)。两种海藻的 C/N 值呈现总体下降的趋势。

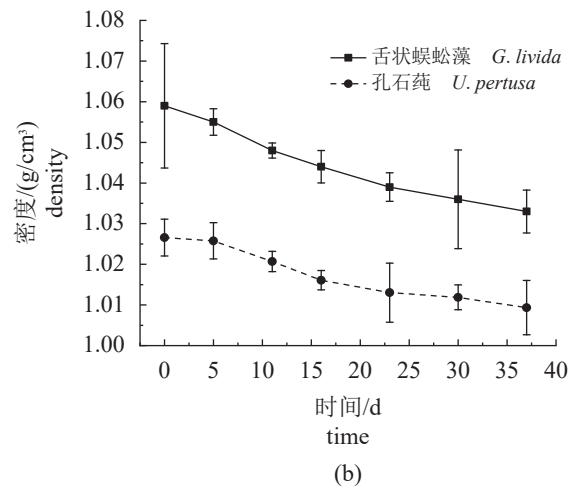
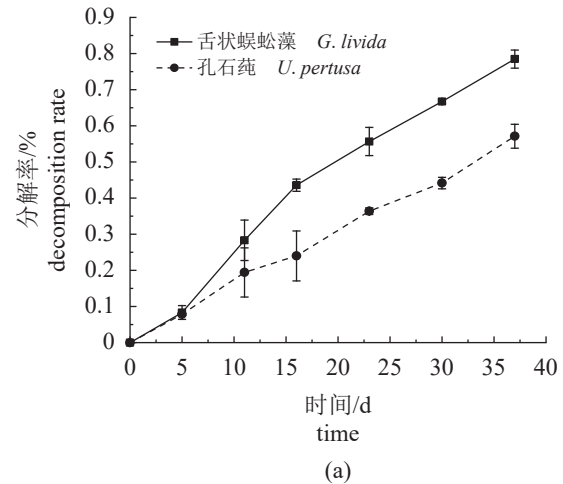


图 1 两种大型海藻碎屑分解过程中分解率 (a) 和密度 (b) 的变化

Fig. 1 Changes in density and decomposition rate of the two types of seaweed during the detritus decomposition process

两种海藻碎屑的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 表现出不同的变化趋势, 舌状蜈蚣藻碎屑较新鲜藻叶值低, 孔石莼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一直处于缓慢上升的趋势, 在 37 d 时较新鲜藻叶上升了 1.11% 。孔石莼 $\delta^{15}\text{N}$ 值在经历分解初期 (0~11 d) 的贫化后, 在分解后期开始富集, 在分解至第 3 时期超越初始值, 分解后期一直处于富集状态。舌状蜈蚣藻 $\delta^{15}\text{N}$ 值一直处于贫化状态, 在分解 5 d 时尤为明显, 分解到 37 d 时较新鲜藻叶贫化了约 1.52% , 之后缓慢富集再贫化, 总体呈现下降趋势。

在分解过程, 两种海藻碎屑的木质素和纤维素含量均呈现下降趋势, 且孔石莼碎屑两种成分的含量均高于舌状蜈蚣藻 (图 3)。两种藻类碎屑的纤维素含量变化趋势均较为平缓, 纤维素含量的

表 1 舌状蜈蚣藻碎屑沉降特征

Tab. 1 Sedimentation characteristics of *G. livida*

时间 time	碎屑类型 type of debris	面积/mm ² area	生物量/g biomass	沉降速度/(m/s) settling speed	样本数 number of samples
新鲜藻体 fresh alga samples	大型碎片 large debris	2 135.395±300.465	0.953 00±0.152 30	0.023±0.006 ^a	34
	中型碎片 middle debris	0.373±0.219	0.000 19±0.000 10	0.015±0.008 ^a	30
	小型碎片 small debris	0.087±0.037	0.000 04±0.000 02	0.005±0.003 ^a	30
第5天 5th day	大型碎片 large debris	1 533.448±183.655	0.680 00±0.079 10	0.021±0.003 ^a	36
	中型碎片 middle debris	0.372±0.222	0.000 18±0.000 11	0.014±0.008 ^a	30
	小型碎片 small debris	0.087±0.038	0.000 04±0.000 02	0.005±0.003 ^a	30
第11天 11th day	大型碎片 large debris	1 072.083±163.384	0.485 20±0.068 10	0.021±0.004 ^a	36
	中型碎片 middle debris	0.368±0.215	0.000 16±0.000 01	0.011±0.005 ^a	30
	小型碎片 small debris	0.082±0.040	0.000 04±0.000 02	0.004±0.003 ^a	30
第16天 16th day	大型碎片 large debris	600.106±83.820	0.175 60±0.034 40	0.019±0.004 ^a	36
	中型碎片 middle debris	0.404±0.201	0.000 16±0.000 01	0.010±0.004 ^a	30
	小型碎片 small debris	0.090±0.040	0.000 04±0.000 02	0.004±0.003 ^a	30
第23天 23th day	大型碎片 large debris	370.083±46.062	0.117 90±0.019 00	0.017±0.003 ^a	36
	中型碎片 middle debris	0.383±0.241	0.000 17±0.000 11	0.010±0.004 ^a	30
	小型碎片 small debris	0.087±0.040	0.000 04±0.000 02	0.004±0.003 ^a	30
第30天 30th day	大型碎片 large debris	324.083±45.360	0.150 70±0.017 70	0.016±0.003 ^b	36
	中型碎片 middle debris	0.383±0.226	0.000 16±0.000 01	0.009±0.004 ^b	30
	小型碎片 small debris	0.086±0.038	0.000 04±0.000 02	0.003±0.002 ^b	30
第37天 37th day	大型碎片 large debris	308.065±295.293	0.126 00±0.104 30	0.016±0.003 ^b	34
	中型碎片 middle debris	0.362±0.230	0.000 15±0.000 01	0.008±0.004 ^b	30
	小型碎片 small debris	0.092±0.040	0.000 04±0.000 02	0.004±0.002 ^a	30

注: 不同字母表示同一分解时期的不同碎屑类型之间差异显著($P<0.05$), 下同。

Notes: different letters indicate significant differences between different types of detritus during the same decomposition periods ($P<0.05$), the same below.

减少主要在分解 16 d 之后, 不同分解时期的差异显著 ($P<0.01$)。孔石莼的木质素含量在分解前 23 d 逐渐减小, 之后变化不明显。舌状蜈蚣藻碎屑的木质素和纤维素的含量较孔石莼表现出多变性, 在分解过程中有的时期升高, 有的时期降低, 总体呈现出下降趋势。

对有机 C 和 N 含量与密度分析发现, 舌状蜈蚣藻碎屑中有机 C 和 N 含量对密度变化影响不显著 ($P>0.05$)。孔石莼碎屑中有机 C 含量对密度没有显著影响 ($P>0.05$), 而有机 N 含量对密度有着显著影响 ($P<0.05$)。C/N 值显著影响两种海藻碎屑的沉降速度和密度 ($P<0.05$)。孔石莼碎屑的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 对其密度有显著影响 ($P<0.05$), 舌状蜈蚣藻碎屑的密度只受 $\delta^{13}\text{C}$ 影响 ($P<0.05$)。两种海藻碎屑的密度都受木质素含量的影响 ($P<0.05$), 纤维素含量对密度的影响不显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 海藻碎屑特性变化及对沉降速度的影响

岛礁海域大型海藻 90% 以上的能量是以碎屑的形式进入食物链^[7], 大型海藻在衰退期后, 分解形成的海藻碎屑在海流的作用下输运到邻近和深海海域并沉降, 对海域的营养供应、生物多样性和鱼类资源养护等起着很大的作用^[7,19]。海藻碎屑沉降与周围流体的相对密度有很大的关系, 决定了海藻碎屑在水流中的沉降时间, 进而决定了海藻场生态辐射功能的潜在规模和空间范围。

大型海藻的分解及所形成的碎屑特征受海流等影响^[13,17]。本研究通过“挂袋法”分析了枸杞岛海藻场两种大型海藻的分解及碎屑成分特征, 其中两种海藻碎屑的 C 和 N 含量、C/N 值的变化趋势与刘雨蒙等^[16]的研究结果相似, 但上述 2 种海

表 2 孔石莼碎屑沉降特征

Tab. 2 Settlement characteristics of *U. detrital*

时间 time	碎屑类型 type of detritus	面积/mm ² area	生物量/g biomass	沉降速率/(m/s) settling speed	样本数 number of samples
新鲜藻体 fresh alga samples	大型碎片 large debris	1 825.729±373.951	0.283 70±0.055 80	0.014±0.005 ^a	39
	中型碎片 middle debris	0.389±0.021 3	0.000 07±0.000 03	0.006±0.004 ^a	30
	小型碎片 small debris	0.089±0.042	0.000 01±0.000 00	0.003±0.001 ^a	30
第5天 5th day	大型碎片 large debris	758.763±227.650	0.124 00±0.037 30	0.014±0.005 ^a	36
	中型碎片 middle debris	0.373±0.221	0.000 06±0.000 04	0.006±0.003 ^a	30
	小型碎片 small debris	0.088±0.043	0.000 01±0.000 01	0.003±0.001 ^a	30
第11天 11th day	大型碎片 large debris	618.307±120.545	0.100 10±0.020 70	0.013±0.003 ^a	36
	中型碎片 middle debris	0.369±0.208	0.000 05±0.000 03	0.005±0.003 ^a	30
	小型碎片 small debris	0.092±0.041	0.000 01±0.000 01	0.003±0.001 ^a	30
第16天 16th day	大型碎片 large debris	654.671±138.920	0.082 80±0.018 20	0.013±0.003 ^a	36
	中型碎片 middle debris	0.361±0.202	0.000 05±0.000 03	0.005±0.003 ^a	30
	小型碎片 small debris	0.090±0.041	0.000 01±0.000 01	0.002±0.001 ^a	30
第23天 23th day	大型碎片 large debris	675.108±162.085	0.080 10±0.020 00	0.012±0.004 ^a	36
	中型碎片 middle debris	0.397±0.235	0.000 05±0.000 03	0.005±0.003 ^a	30
	小型碎片 small debris	0.090±0.040	0.000 01±0.000 01	0.002±0.001 ^a	30
第30天 30th day	大型碎片 large debris	774.424±255.230	0.093 10±0.029 90	0.011±0.003 ^a	36
	中型碎片 middle debris	0.388±0.233	0.000 04±0.000 03	0.005±0.003 ^a	30
	小型碎片 small debris	0.092±0.040	0.000 01±0.000 01	0 (悬浮) ^b	30
第37天 37th day	大型碎片 large debris	541.115±176.796	0.084 20±0.018 90	0.012±0.004 ^a	34
	中型碎片 middle debris	0.374±0.232	0.000 04±0.000 02	0.005±0.002 ^a	30
	小型碎片 small debris	0.095±0.040	0.000 01±0.000 00	0 (悬浮) ^b	30

藻碎屑的特征值与刘雨蒙等^[16]的研究存在较大差异, 主要体现在本研究中舌状蜈蚣藻的特征值高于孔石莼(图 2), 这可能与两种大型海藻分解所处的实验条件不同所致。尽管两个研究分别采用“挂袋法”和“原位埋袋法”来观测海藻的分解过程, 两种方法本质上都是将大型海藻放置在海底, 通过模拟大型海藻自然状态下的过程来分析海藻碎屑特征。但刘雨蒙等^[16]是在枸杞岛后头湾海藻场开展模拟实验, 实验区域靠近贻贝养殖区, 海水富营养化, 海水交换较缓慢。本研究是在枸杞岛的东部, 外部无贻贝养殖等影响, 受到风浪影响较大, 进而导致两种大型海藻的分解过程及碎屑组分存在较大的差异。值得注意的是, 舌状蜈蚣藻作为分解速率较快的藻类, 其碎屑特征在不同分解实验时间变化较大^[16], 本研究主要分析了两种海藻分解成为碎片(小型碎片)阶段的分解特征, 实验时间历时 37 d, 而刘雨蒙等^[16]研究了舌状蜈蚣藻前 18 d 的分解过程和海藻碎屑组分的变化特征, 这可能也是导致上述差异的原因。

大型水生植物体的 C/N 值是影响其分解速率的关键因素, C/N 值高其分解速率快, 反之变慢^[20], 进而影响植物体碎屑的组分和密度。本研究发现, 在整个分解时期舌状蜈蚣藻的 C/N 值高于孔石莼(图 2), 由于孔石莼体内所含的木质素和纤维素等难分解物质较多, 导致舌状蜈蚣藻的分解速率和密度高于孔石莼(图 1)。大型海藻分解过程中, 通过可溶性化合物(包括低分子量酚类物质)的浸出和结构聚合物的分解, 纤维素和木质素的相对含量增加, 导致大型海藻碎屑的营养增加^[21]。江蓠(*Gracilaria foliifera*)等大型海藻木质素含量在分解前期下降较快, 随后平缓下降^[22]。

3.2 现场环境对海藻碎屑沉降和分布的影响

本研究表明, 舌状蜈蚣藻和孔石莼碎屑在静水中的沉降速度分布在 3 个档次, 并且与其粒径大小相对应, 出现了 0.830、0.380 和 0.180 mm 等 3 个“临界粒径”。大型海藻碎屑在海水中不仅受到自身重力的影响, 还会受到海水的黏性力和浮

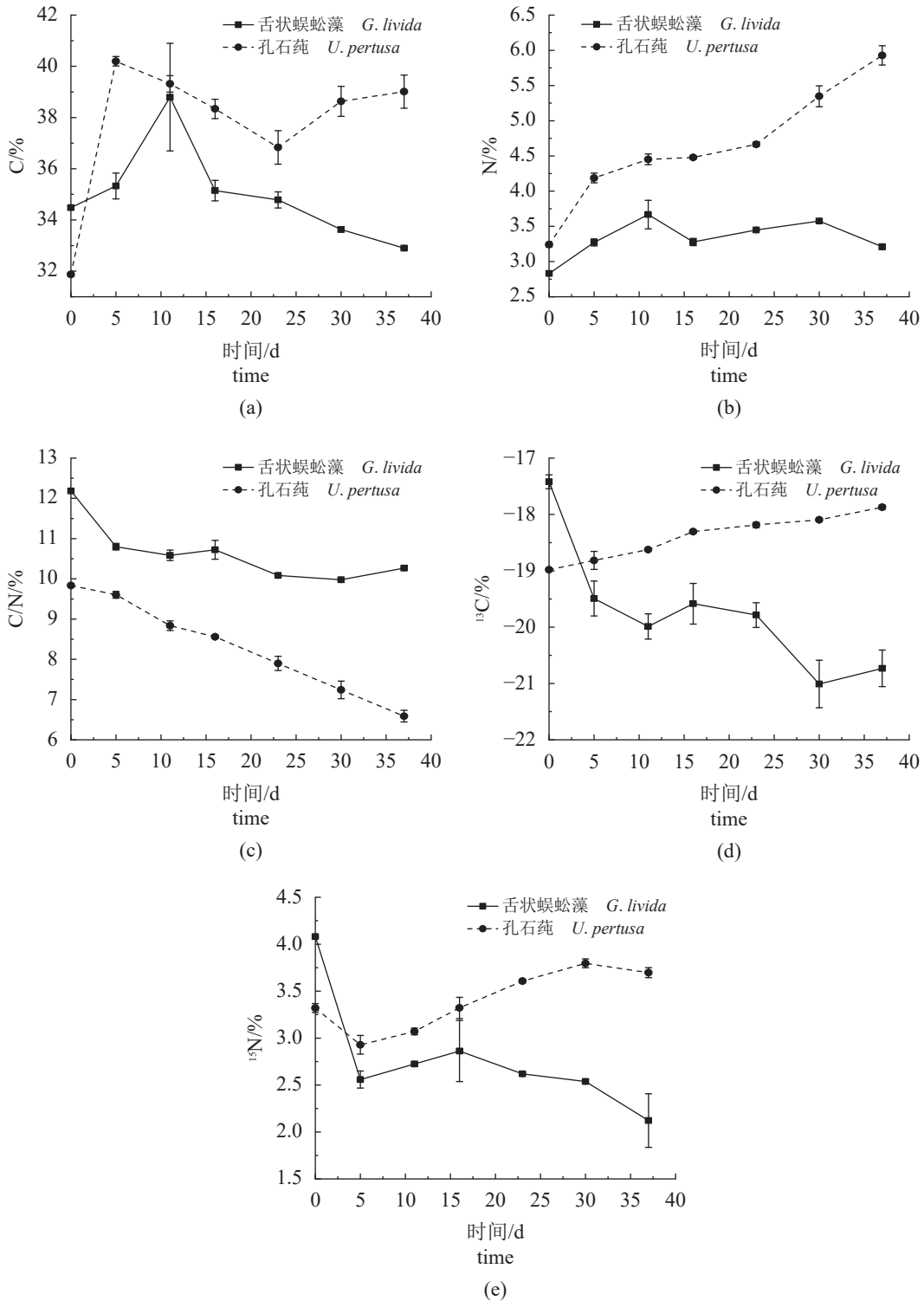


图 2 两种大型海藻碎屑分解过程中组成成分含量

Fig. 2 Content and changes of components in the decomposition process of two types of seaweed detritus

力等的影响, 特定时间由于海水性质的改变就会引起海藻碎屑沉降速度的变化。对于小于0.830 mm 的海藻碎屑, 其沉降速度可以通过 Stokes 公式计算^[23], 根据现场海水的黏性系数和密度计

算出舌状蜈蚣藻和孔石莼的沉降速度(图 4), 发现舌状蜈蚣藻的沉降速度与静水沉降实验结果比较符合, 而孔石莼存在较大差异, 特别是在 0.830 mm 临界粒径时的沉降速度, 显著小于静水沉降实验

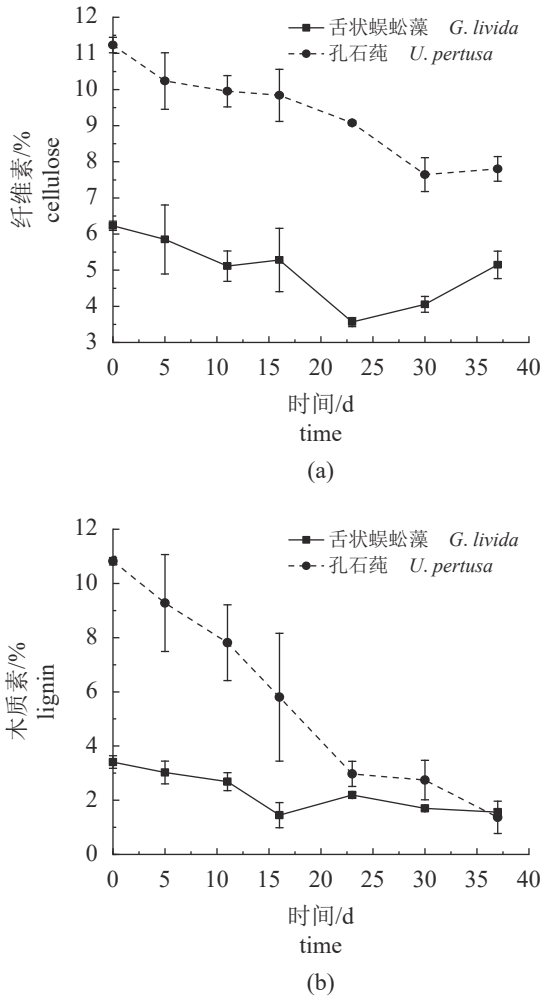


图3 两种大型海藻碎屑分解过程中纤维素 (a) 和木质素 (b) 质量百分比

Fig. 3 Weight percentages of cellulose (a) and lignin (b) during the decomposition of two types of seaweed detritus

结果。基于此, 本研究对两种大型海藻碎屑的临界粒径的划分只限定在枸杞岛海藻场及邻近海域。

实际海域中, 大型海藻碎屑沉降和分布过程复杂多变, 主要与碎屑本身特征、波浪、摄食等生物作用以及水动力过程影响有关^[24-27, 19], 吴程宏等^[13]研究了枸杞岛后头湾和黄石洞 2 处海藻场的大型海藻碎屑沉积特征, 发现受波浪和海流影响较大的黄石洞海藻场产生的海藻碎屑输送范围大于后头湾海藻场。大型海藻碎屑输送和分布决定着海藻场的生态辐射范围, Tallis^[28]研究表明, 华盛顿海域 23 m 深度内, 海藻碎屑积累占比为 70%。本研究为探讨水平流速对两种大型海藻碎屑运输距离的影响, 以大型和中型碎屑沉降到枸杞岛海藻场外围水深 10 m 所需时间为基准及现场测得平

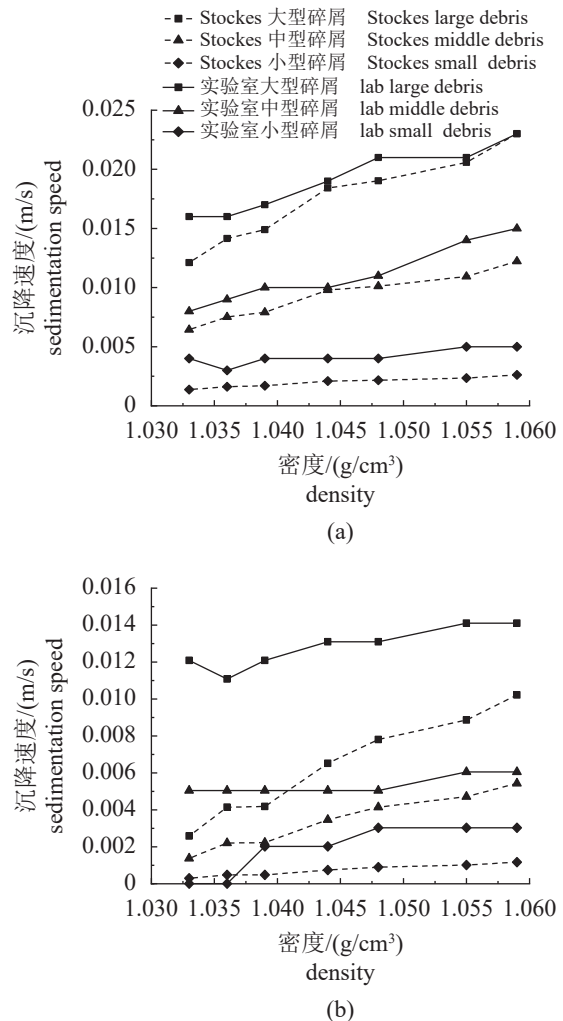


图4 不同密度和粒径的舌状蜈蚣藻 (a) 和孔石莼 (b) 碎屑依据 Stokes 公式和静水沉降实验所得到的沉降速度

Fig. 4 Sedimentation speed of *G. livida* (a) and *U. pertusa* (b) with different density and particle size according to the Stokes formula and static water sedimentation experiment

均离岸流速 0.20 m/s 进行计算, 得出海藻碎屑随水流分布的范围基本在 200 m 的近岸 (图 5)。同时期对该海域沉积物有机质贡献率的研究表明, 有 65% 的海藻碎屑分布在海藻场及周边 200 m 范围内, 与本研究中模拟海藻碎屑的运输范围一致, 且在该范围内鱼类等生物资源丰富^[29]。枸杞岛海藻场的孔石莼等大型海藻碎屑为条纹隔贻贝 (*Sep-tifer virgatus*)、厚壳贻贝 (*Mytilus coruscus*)、短毛海鳞虫 (*Halosydna brevisetosa*) 和浮游动物等提供饵料^[19, 30], 经过底栖杂食小型虾蟹类的摄食, 进而支撑星康吉鳗 (*Conger myriaster*) 等较大型的底栖经济鱼类资源。

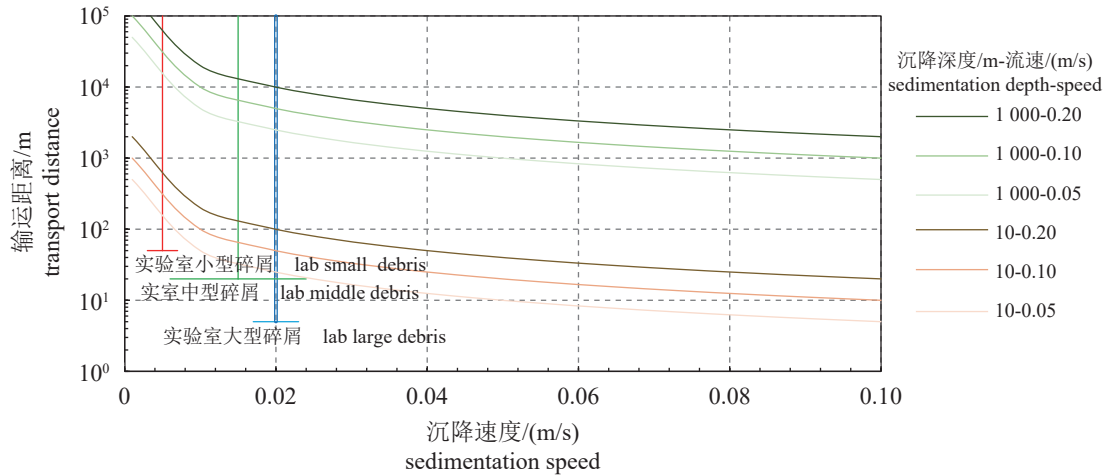


图 5 两组沉降深度-流速下, 碎屑在不同沉降速度下的运输距离

Fig. 5 Transport distance of debris settlement velocity range values at different horizontal flow rates under two groups of settlement depths

近年来, 大型海藻受到人类活动的影响, 海藻场面积不断减少, 海藻场所维持的生物资源也不断衰竭^[31-32]。大型海藻分解及其碎屑沉降是多个因素相互作用的结果。本研究以枸杞岛海藻场舌状蜈蚣藻和孔石莼的分解为例, 构建了海藻碎屑沉降和运输模型, 为解析大型海藻碎屑对岛礁海域渔业资源的能量供给和生物多样性维持机制提供了科学依据。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Guidetti P, Fanelli G, Frascchetti S, *et al.* Coastal fish indicate human-induced changes in the Mediterranean littoral[J]. *Marine Environmental Research*, 2002, 53(1): 77-94.
- [2] Choat J H, Ayling A M. The relationship between habitat structure and fish faunas on New Zealand reefs[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1987, 110(3): 257-284.
- [3] Trebilco R, Dulvy N K, Stewart H, *et al.* The role of habitat complexity in shaping the size structure of a temperate reef fish community[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2015, 532: 197-211.
- [4] Anderson T W. Role of macroalgal structure in the distribution and abundance of a temperate reef fish[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 113(3): 279-290.
- [5] 钟逸云, 郗晓峰, 邢浩, 等. 大型海藻对海水水族箱生态微宇宙结构及稳定性的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(2): 421-432.
- [6] Zhong Y Y, Gao X F, Xing H, *et al.* Effects of macroalgae on the ecological microcosm's structure and stability of aquarium[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(2): 421-432 (in Chinese).
- [7] Siddon E C, Siddon C E, Stekoll M S. Community level effects of *Nereocystis luetkeana* in southeastern Alaska[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 361(1): 8-15.
- [8] Nakajima R, Yamazaki H, Lewis L S, *et al.* Planktonic trophic structure in a coral reef ecosystem -grazing versus microbial food webs and the production of *Mesozooplankton*[J]. *Progress in Oceanography*, 2017, 156: 104-120.
- [9] 黄宏, 王霄, 罗予杉, 等. 大型海藻对重金属富集作用、影响因素及应用[J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(5): 1158-1167.
- [10] Huang H, Wang X, Luo Y S, *et al.* Enrichment, influencing factors and applications of heavy metals by macroalgae[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(5): 1158-1167 (in Chinese).
- [11] Gerard V A. Some Aspects of material dynamics and energy flow in a kelp forest in monterey Bay, California[D]. Santa Cruz: California Sea Grant College Program, 1976.
- [12] Harrold C, Reed D C. Food availability, sea urchin grazing, and kelp forest community structure[J]. *Ecology*, 1985, 66(4): 1160-1169.
- [13] Krumhansl K A, Scheibling R E. Production and fate of kelp detritus[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 347: 11-20.

- 467: 281-302.
- [12] Filbee-Dexter K, Wernberg T, Norderhaug K M, *et al.* Movement of pulsed resource subsidies from kelp forests to deep fjords[J]. *Oecologia*, 2018, 187(1): 291-304.
- [13] 吴程宏, 章守宇, 周曦杰, 等. 岛礁海藻场沉积有机物来源辨析[J]. 水产学报, 2017, 41(8): 1246-1255.
- Wu C H, Zhang S Y, Zhou X J, *et al.* Identifying sources of sedimentary organic matter in the rocky reef seaweed bed[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, 41(8): 1246-1255 (in Chinese).
- [14] Duggins D O, Simenstad C A, Estes J A. Magnification of secondary production by kelp detritus in coastal marine ecosystems[J]. *Science*, 1989, 245(4914): 170-173.
- [15] Kaehler S, Pakhomov E A, Kalin R M, *et al.* Trophic importance of kelp-derived suspended particulate matter in a through-flow sub-Antarctic system[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 316: 17-22.
- [16] 刘雨蒙, 章守宇, 周曦杰, 等. 枸杞岛海藻场大型海藻凋落物碳氮稳定同位素分析[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(3): 438-444.
- Liu Y M, Zhang S Y, Zhou X J, *et al.* C/N stable isotope analysis of macro algae litters in kelp bed in Gouqi Island[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(3): 438-444 (in Chinese).
- [17] 邹敏, 章守宇, 周曦杰. 温度和光照强度对海藻场瓦氏马尾藻碎屑分解的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(2): 428-435.
- Zou M, Zhang S Y, Zhou X J. The influence of temperature and light intensity on *Sargassum vachellianum* detritus decomposition[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(2): 428-435 (in Chinese).
- [18] Wernberg T, Filbee-Dexter K. Grazers extend blue carbon transfer by slowing sinking speeds of kelp detritus[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 17180.
- [19] 蒋日进, 章守宇, 毕远新, 等. 枸杞岛海藻场小型无脊椎动物的食物来源[J]. 水产学报, 2015, 39(10): 1487-1498.
- Jiang R J, Zhang S Y, Bi Y X, *et al.* Food sources of small invertebrates in the seaweed farm of Goji Island[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2015, 39(10): 1487-1498 (in Chinese).
- [20] Robertson A I. Decomposition of mangrove leaf litter in tropical Australia[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1988, 116(3): 235-247.
- [21] Zimmer M, Danko J, Pennings S, *et al.* Cellulose digestion and phenol oxidation in coastal isopods (Crustacea: Isopoda)[J]. *Marine Biology*, 2002, 140(6): 1207-1213.
- [22] Tenore K R, Hanson R B, McClain J, *et al.* Changes in composition and nutritional value to a benthic deposit feeder of decomposing detritus pools[J]. *Bulletin of marine science*, 1984, 35(3): 299-311.
- [23] Aarne V P, Jeffrey P J, Weiner R F. *Environmental Engineering*[M]. 3rd ed. UK: Butter worth Heinemann, 1994.
- [24] You Z J. Fine sediment resuspension dynamics in a large semi-enclosed bay[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(16): 1982-1993.
- [25] Riccialdelli L, Newsome S D, Fogel M L, *et al.* Trophic interactions and food web structure of a subantarctic marine food web in the Beagle Channel: Bahía Lapataia, Argentina[J]. *Polar Biology*, 2017, 40(4): 807-821.
- [26] Duggins D O, Gómez-Buckley M C, Buckley R M, *et al.* Islands in the stream: kelp detritus as faunal magnets[J]. *Marine Biology*, 2016, 163(1): 17.
- [27] Gibran F Z, De Moura R L. The structure of rocky reef fish assemblages across a nearshore to coastal islands' gradient in Southeastern Brazil[J]. *Neotropical Ichthyology*, 2012, 10(2):
- [28] Tallis H. Kelp and rivers subsidize rocky intertidal communities in the Pacific Northwest (USA)[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2009, 389: 85-96.
- [29] 章守宇, 汪振华, 林军, 等. 枸杞岛海藻场夏、秋季的渔业资源变化[J]. 海洋水产研究, 2007(1): 45-52.
- Zhang S Y, Wang Z H, Lin J, *et al.* Changes of fishery resources in the seaweed farm of Gouqi Island in summer and autumn[J]. *Research on Marine Fisheries*, 2007(1): 45-52 (in Chinese).
- [30] 蒋日进, 章守宇, 王凯, 等. 枸杞岛近岸海域食物网的稳定同位素分析[J]. 生态学杂志, 2014, 33(4): 930-938.
- Jiang R J, Zhang S Y, Wang K, *et al.* Stable isotope analysis of food webs in the coastal waters of Goji Island[J]. *Journal of Ecology*, 2014, 33(4): 930-938 (in Chinese).
- [31] Araújo R M, Assis J, Aguillar R, *et al.* Status, trends and drivers of kelp forests in Europe: an expert assessment[J]. *Biodivers Conserv*, 2016, 30: 1319-1348
- [32] Krumhansl K A, Okamoto D K, Rassweiler A, *et al.* Global patterns of kelp forest change over the past half-century[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(48): 13785-13790.

Decomposition and sedimentation of two species of macro algae detritus at the Gouqi Island seaweed beds

XIA Yanfang^{1,2}, ZHANG Shouyu^{1,2*}, WANG Kai^{1,2}, XU Peng^{1,2}, LI Na^{1,2}, LI Xunmeng^{1,2}

(1. School of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Engineering Research Center of Marine Ranching, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The amount and species diversity of fish and other biological resources in island and reef waters are significantly higher than those in the surrounding waters, which is closely related to seaweed beds. As a typical off-shore aquatic plant near islands and reefs, more than 90% of its energy enters the food chain in the form of detritus, providing an extremely important energy basis for the conservation and production of biological resources in island and reef waters. In order to explore the decomposition process of macroalgae, the composition and sedimentation characteristics of algal debris, and explore the contribution of macroalgae detritus to the potential scale of ecological functions of the seaweed beds, detritus of *Ulva pertusa* and *Grateloupia livida* from the seaweed beds of Gouqi Island was collected by on-site bag hanging and laboratory hydrostatic sedimentation process, and then analyzed in its composition, particle size and chemical characteristics. Results of the present study showed that the detritus density of *U. pertusa* and *G. livida* decreased gradually during the decomposition process, and there were no significant differences among different decomposition stages ($P>0.05$). The content of organic C and organic N in the detritus of *G. livida* had no significant effect on the change in density ($P>0.05$), while the content of organic C in the detritus of *U. pertusa* had no significant effect on its density ($P>0.05$), whereas the content of organic N had a significant effect on this index ($P<0.05$). *U. pertusa* fragmental $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ had a significant effect on its density ($P<0.05$), and the density of *G. livida* detritus was only affected by $\delta^{13}\text{C}$ ($P<0.05$). In the decomposition process, the lignin and cellulose contents of the fragments of the two seaweeds showed a downward trend, and the contents of the two components of the fragments of *U. pertusa* were higher than those of *C. ligulate*. The density of both algal detritus was significantly affected by lignin content ($P<0.05$), while the cellulose content had no significant effect on their density ($P>0.05$). Particle size is one of the critical factors for the settling speed of the two species of seaweed detritus. The settling speeds of large detritus (>0.830 mm), medium detritus (0.380-0.830 mm) and small detritus (0.180-0.380 mm) of *G. livida* were 0.016-0.023, 0.008-0.015 and 0.004-0.005 m/s, respectively, and those of *U. pertusa* were 0.011-0.014, 0.005-0.006 and 0-0.003 m/s, respectively. This study provides useful scientific evidence for studies on the detritus of macroalgae as well as for studies on the ecological radiation range of seaweed beds.

Key words: *Grateloupia livida*; *Ulva pertusa*; detritus; sedimentation characteristics; particle size; density; Gouqi Island

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

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (41876191); China Agriculture Research System (CARS-50); Special Fund for Science and Technology Development of Shanghai Ocean University (A2-2006-20-200207)