

岛礁海藻场沉积有机物来源辨析

吴程宏^{1,2}, 章守宇^{1*}, 周曦杰¹, 王凯¹, 陈亮然¹

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 海南省海洋与渔业科学院, 海南海口 571126)

摘要: 海藻场的沉积有机物(sedimentary organic matter, SOM)是实现海藻场生态系统服务功能的重要物质基础, 本实验以枸杞岛北部海藻场为研究区域, 围绕大型海藻周年生活史的幼苗&生长、成熟&茂盛和衰退&凋亡3个阶段, 于2014年7月凋亡期、2014年10月生长期和2015年5月茂盛期对海藻场的SOM进行样品采集, 并运用碳、氮稳定同位素技术, 以C/N、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 为指标分析了SOM的来源及变化。结果显示, 1) 7月、10月和翌年5月的SOM C/N的变化范围分别为5.9~6.6、6.0~6.9和5.4~6.2, 可判定海藻场SOM是典型的海源性来源; 2) 7月不同水深的SOM $\delta^{13}\text{C}$ 值空间变化明显, 介于 -20.3‰ ~ -17.6‰ , 而10月和翌年5月都不显著, 分别介于 -22.3‰ ~ -21.7‰ 和 -21.4‰ ~ -21.0‰ ; 3) SOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在时间变化, 而7月 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在不同水深的空间变化; 4) $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 和C/N之间的关系表明, 7月SOM主要来源于浮游植物和大型海藻的混合贡献, 而10月和翌年5月SOM则主要来源于浮游植物贡献; 5) 根据碳稳定同位素质量平衡混合模型计算得到, 7月大型海藻对该海藻场SOM的平均贡献率最高可达53.71%; 6) 大型海藻产生的碎屑在SOM占比受波浪等海域动力环境影响显著。

关键词: 海藻场; 沉积有机物; 来源; 贡献率

中图分类号: P 736.4; S 917.3

文献标志码: A

岛礁海藻场是一种由大型底栖海藻群落支撑的典型近岸栖息地, 可为多种无脊椎动物和鱼类提供栖息空间, 并提供摄食、产卵及避敌场所, 是海洋中最具生产力的生境之一^[1-3]。大型海藻覆盖的岩礁近岸水域, 其底栖动物和鱼类群落的种类多样性、丰度、密度等指数甚至可以达到外围海域的3倍以上^[4-5]。海藻场的食物网结构十分复杂, 除了分别以大型海藻、浮游植物和附着或底栖微藻为基础的牧食食物链之外, 还存在着分别以生物残骸和动物粪便, 以及大型海藻碎屑为基础的碎屑食物链^[6-7]。在一些海藻场, 各摄食类群的大型底栖无脊椎动物中, 完全或兼顾摄食利用沉积有机物(sedimentary organic matter, SOM)(包括藻体凋落物、粪便、腐尸、底泥等)的食碎屑者、食底泥者和肉食者(捕

食者和食腐动物)的种类数分别占海藻场生物种类数的18%、15%和52%, 即海藻场底栖生物多达85%的种类以不同的方式在利用SOM^[8]。因此, 海藻场的SOM对于维系岛礁海域的种类多样性和资源生物量起着非常重要的作用。

海藻场SOM的来源复杂, 有来自大型海藻产生的碎屑和浮游植物的自然沉降, 还有来自陆地边缘植被产生的碎屑和人类活动产生的有机物^[9]。鉴别海藻场SOM的来源及估算各来源所占的百分比, 是解构海藻场物质基础组成、分析海藻场能流路径与转换效率的关键所在。与传统的粒度分析等方法相比, 碳氮稳定同位素技术在SOM溯源分析中能够获得更高的准确性^[10-11], 尤其是 $\delta^{13}\text{C}$ 的化学性质相对保守, 在有机物的转运和转化过程中变化较小, 因此可以很好地定

收稿日期: 2016-03-15 修回日期: 2016-10-07

资助项目: 国家自然科学基金(41176110, 41406153); 公益性行业(农业)科研专项(201303047)

通信作者: 章守宇, E-mail: syzhang@shou.edu.cn

量指示环境中SOM的来源及其占比^[12-14]。

由于岩礁底质的特殊性, 常规的沉积物捕获器无法采集沉积物样本, 这可能导致了目前国内外少有涉及岛礁海藻场SOM来源的研究。本实验通过在海藻场潜水埋设固定PVC管, 再定期潜水取回PVC管, 获得自然状态下的海藻场沉积物, 并利用碳氮稳定同位素技术, 以C/N、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值为指标来分析海藻场SOM的来源, 分析大型海藻优势种对SOM的贡献, 为岛礁海藻场生态过程研究提供基础。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

研究区域枸杞岛(30°41'~30°44'N, 122°44'~122°48'E)位于浙江舟山群岛东北部海域, 岛屿在西北—东南方向上呈T字形, 岸线总长22.5 km, 除东南部和西南部有2处沙地, 其岸线90%为岩礁。2014年5月使用Biosonics DT-X回声探测仪环岛扫描并结合现场潜水观测与采样调查表明, 枸杞岛海藻场共有3门5属7种大型底栖海藻, 以褐藻类为主。其中铜藻(*Sargassum horuerei*)为绝对优势种, 占总大型海藻生物量的85.8%。其余优势种依次为瓦氏马尾藻(*S. vachellianum*, 6.7%)、孔石莼(*Ulva pertusa*, 3.3%)、羊栖菜(*Hizikia fusiforme*, 1.7%)、粗枝软骨藻(*Chondria crassicaulis*, 0.9%), 这5个优势种的合计生物量占98.4%。该海藻场大型海藻分布的外缘水深约6 m、离岸宽度小于20 m; 在水平方向上, 东南侧大型海藻分布稀少, 平均覆盖率约为28%, 仅在几个小型内湾有少量分布; 而西北侧则分布较为广泛, 且呈现斑块状(长度1~30 m)不连续的分布状态, 平均覆盖率约为86%。

本研究考虑枸杞岛周边海域波浪、海流以及人类活动等可能对海藻场SOM的组成与分布所产生的影响, 选取北部大型海藻覆盖率较高的后头湾(HTW)和西北部附属岛屿黄石洞(HSD)为研究区域(图1)。后头湾靠近码头、波浪较小(爆波强度3.0), 但有一定量的渔获杂物及废水流入; 黄石洞为人类干扰因素较少的开放区域, 受东北季风引起的波浪和海流影响大(爆波强度4.1)。基于枸杞岛海藻场大型海藻优势种铜藻具有周年生活史阶段(幼苗&生长阶段8月—翌年3月、成熟&茂盛阶段4—5月、衰退&凋亡阶

段6—7月)的特点^[15], 本研究分别于2014年7月、2014年10月和2015年5月对该海藻场进行了沉积物及其他样品的采集工作。

1.2 样品采集与处理方法

沉积物样品采集 柱状沉积物捕获器的高度与直径之比大于15时可有效采集沉积物而不致外逸^[16], 本实验采用SCUBA潜水在海藻场岩礁固定PVC管(高度80 cm/直径5 cm>15), 在HTW和HSD分别随机设计3条垂直岸线的样带作为平行样, 样带间隔5 m, 共6条样带(图1); 每条样带在2.5、3.0、3.5和4.0 m水深处固定PVC管, 沉积时间为10 d, 采样时间为2014年7月(大型海藻凋亡期)、2014年10月(大型海藻生长期)和2015年5月(大型海藻茂盛期)。将采集的沉积物用63 μm 筛绢过滤, 所获得的颗粒物在烘箱中60 °C烘48 h至恒重; 再用1 mol/L的HCl酸化沉积物样品, 每隔1 h搅拌摇匀1次, 直至没有气泡产生; 然后用去离子水反复冲洗SOM样品5次, 去除样品中残余的HCl, 最后将酸化后的SOM样品置于烘箱中, 60 °C烘48 h至恒重。

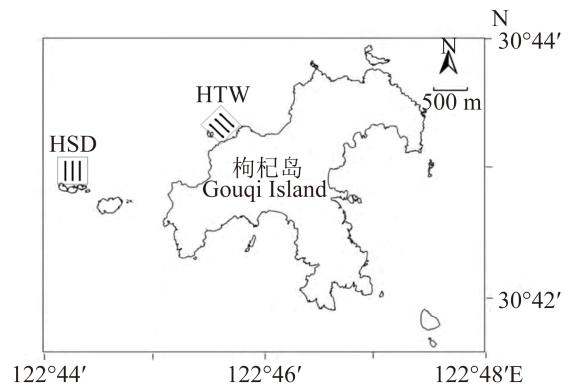


图1 枸杞岛2个调查区域位置

Fig. 1 Map of Gouqi Island showing locations of the two study areas

大型海藻组样品采集 采用SCUBA潜水方法进行水下采样, 在HTW和HSD海藻场分别随机采集3个样方, 样方面积为30 cm×30 cm, 采集时间为2014年5月。每个样方不同的大型海藻按照各自生物量比例, 组合成大型海藻组样品。将获取的大型海藻组样品在过滤海水中荡洗, 去除海藻表面附着的一些有机颗粒和微型生物, 待洗净后, 用去离子水冲洗海藻表面3次, 再将所得样品在烘箱中60 °C烘48 h至恒重。

浮游植物样品采集 用浅水III型浮游生

物网(77 μm)垂直拖方式,采集浮游植物,先除去浮游动物和碎屑等,用筛绢(160 μm)进行过滤到预先经马弗炉550 $^{\circ}\text{C}$ 灼烧4~6 h的GF/F膜上。采样时间为2014年7月,对HTW和HSD区域分别随机采集3个样本作为平行样。

悬浮颗粒有机物(suspended particulate organic matter, POM)样品采集 用采水器采取表层水1~2 L,取其中的500 mL过170 μm 的筛绢后,用预先在马弗炉550 $^{\circ}\text{C}$ 灼烧过的GF/F膜过滤,所得样品即为POM样品。采样时间为2014年7月,对HTW和HSD区域分别随机采集3个样本作为平行样。

1.3 参数测定方法

采用Varie EL III元素分析仪测定样品(POM、SOM、大型海藻组和浮游植物)的TOC和TN含量,计算其碳氮比C/N。采用DELTA V Advantage同位素比率质谱仪(Isotope Ratio Mass Spectrometer)测定样品的稳定同位素组成($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)。其原理为利用样品在元素分析仪中高温燃烧后生成 CO_2 和 N_2 ,通过检测 CO_2 的 ^{13}C 与 ^{12}C 比率以及 N_2 的 ^{15}N 与 ^{14}N 比率,并与国际标准物(PDB)比对后计算出样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值($\delta^{13}\text{C}$ 值的测定精度 $\leq\pm 0.2\text{‰}$),与国际标准物(纯化的大气中 N_2)比对后计算出样品的 $\delta^{15}\text{N}$ 值($\delta^{15}\text{N}$ 值的测定精度 $\leq\pm 0.3\text{‰}$)^[17-18]。

1.4 数据分析

碳氮稳定同位素通过以下公式进行计算:

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

式中, X 代表 ^{13}C 和 ^{15}N , R 代表 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$, δ 值的大小与采取的标准有关,进行同位素分析前首先要选择合适的标准,不同样品间的比较必须采取同一标准^[19-20]。

所有的数据进行差异显著性检验,采用统计软件SPSS 19.0单因素方差分析(One-Way ANOVA, Tukey氏检验),比较不同水深SOM的C/N、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 差异,差异显著性水平 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 SOM的潜在来源 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 组成特征

2014年5月在HTW和HSD海藻场采集的大型海藻组样品的稳定碳氮同位素值:大型海藻组的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-14.4\text{‰}\sim-18.2\text{‰}$,均值为 $-16.4\text{‰}\pm 1.7\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $3.9\text{‰}\sim 5.2\text{‰}$,均值为 $4.7\text{‰}\pm 2.6\text{‰}$ 。2014年7月在HTW和HSD海藻场采集的浮

游植物和POM样品的稳定碳氮同位素值:浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-21.3\text{‰}\sim-19.2\text{‰}$,均值为 $-20.2\text{‰}\pm 0.6\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $3.8\text{‰}\sim 4.2\text{‰}$,均值为 $3.9\text{‰}\pm 2.1\text{‰}$; POM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-20.3\text{‰}\sim-19.0\text{‰}$;均值为 $-19.2\text{‰}\pm 1.4\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $4.9\text{‰}\sim 5.2\text{‰}$,均值为 $5.0\text{‰}\pm 1.4\text{‰}$ (表1)。单因素方差分析显示,在2014年7月所采集的POM和浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不显著($F=4.583$, $P>0.05$),2014年7月采集的POM和2014年5月采集的大型海藻组的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著($F=8.972$, $P<0.05$)。在本研究中,因为POM和浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不显著,且值域重叠,初步认为POM主要来源于浮游植物。

表1 潜在来源的稳定同位素组成及碳氮比

Tab. 1 Stable isotope and molar C/N ratios of the potential sources in seaweed bed

| 样本 sample | $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ | $\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$ | C/N | n |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|-----|
| 浮游植物 phytoplankton | -20.2 ± 0.6 | 3.9 ± 2.1 | 7.3 ± 1.2 | 6 |
| 颗粒有机物 POM | -19.2 ± 1.4 | 4.9 ± 1.4 | 7.6 ± 1.6 | 6 |
| 大型海藻组 macroalgae | -16.4 ± 1.7 | 4.7 ± 2.6 | 8.2 ± 2.4 | 6 |

2.2 SOM $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 组成及分布特征

基于大型海藻的周年生活史阶段,在HTW和HSD每对应阶段都有24个SOM同位素样品,3个大型海藻生活史阶段总共分析了72个SOM同位素样品,对数据进行分析发现,在大型海藻凋亡期(7月),HTW和HSD SOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围分别为 $-18.9\text{‰}\sim-17.6\text{‰}$ 和 $-20.3\text{‰}\sim-19.1\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围分别为 $2.3\text{‰}\sim 3.0\text{‰}$ 和 $2.3\text{‰}\sim 3.0\text{‰}$,不同水深 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的均值见表2。单因素方差分析显示,在HTW和HSD不同水深的SOM $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著($F_{\text{HTW}}=8.078$, $F_{\text{HSD}}=7.154$, $P<0.05$),不同水深的 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异不显著($F_{\text{HTW}}=5.451$, $F_{\text{HSD}}=4.737$, $P>0.05$)。

在大型海藻生长期(10月),HTW和HSD SOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围分别为 $-22.3\text{‰}\sim-21.7\text{‰}$ 和 $-22.3\text{‰}\sim-21.8\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围分别为 $3.5\text{‰}\sim 4.0\text{‰}$ 和 $3.1\text{‰}\sim 4.4\text{‰}$,不同水深 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的均值见表3。单因素方差分析显示,在HTW和HSD不同水深的SOM $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不显著($F_{\text{HTW}}=5.325$, $F_{\text{HSD}}=6.836$, $P>0.05$),不同水深的 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异不显著($F_{\text{HTW}}=6.445$, $F_{\text{HSD}}=4.221$, $P>0.05$)。

表 2 在7月HTW和HSD沉积有机物的稳定同位素组成及碳氮比

Tab. 2 Stable isotope and molar C/N ratios of SOM from HTW and HSD in July

| 水深/m depth | $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ | | $\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$ | | C/N | |
|---------------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|---------|---------|---------|
| | HTW | HSD | HTW | HSD | HTW | HSD |
| 2.5 | -17.6±0.5 | -19.1±0.7 | 2.9±0.1 | 2.4±0.2 | 6.0±0.2 | 6.0±0.1 |
| 3.0 | -18.1±0.7 | -20.0±0.5 | 2.6±0.2 | 2.9±0.2 | 6.1±0.2 | 6.2±0.2 |
| 3.5 | -18.3±0.7 | -19.9±0.6 | 2.7±0.3 | 2.6±0.2 | 6.4±0.3 | 6.5±0.1 |
| 4.0 | -18.4±0.6 | -20.2±0.5 | 3.0±0.2 | 2.7±0.2 | 6.0±0.1 | 6.4±0.1 |

表 3 在10月HTW和HSD沉积有机物的稳定同位素组成及碳氮比

Tab. 3 Stable isotope and molar C/N ratios of SOM from HTW and HSD in October

| 水深/m depth | $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ | | $\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$ | | C/N | |
|---------------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|---------|---------|---------|
| | HTW | HSD | HTW | HSD | HTW | HSD |
| 2.5 | -21.8±0.4 | -22.2±0.3 | 3.7±0.2 | 3.5±0.1 | 6.5±0.2 | 6.7±0.3 |
| 3.0 | -21.8±0.2 | -22.1±0.3 | 3.6±0.1 | 3.2±0.2 | 6.2±0.2 | 6.5±0.1 |
| 3.5 | -22.2±0.4 | -21.8±0.3 | 3.6±0.2 | 3.4±0.2 | 6.5±0.2 | 6.4±0.1 |
| 4.0 | -22.0±0.3 | -22.2±0.3 | 4.0±0.3 | 3.6±0.4 | 6.6±0.1 | 6.4±0.2 |

在大型海藻茂盛期(5月), HTW和HSD SOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围分别为 $-21.3\text{‰} \sim -21.0\text{‰}$ 和 $-21.4\text{‰} \sim -21.0\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围分别为 $0.9\text{‰} \sim 1.5\text{‰}$ 和 $1.0\text{‰} \sim 1.6\text{‰}$, 不同水深 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的均值见

表4。单因素方差分析显示, 在HTW和HSD不同水深的SOM $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不显著($F_{\text{HTW}}=4.095$ 、 $F_{\text{HSD}}=6.636$, $P>0.05$), 不同水深的 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异不显著($F_{\text{HTW}}=6.673$ 、 $F_{\text{HSD}}=5.886$, $P>0.05$)。

表 4 在翌年5月HTW和HSD沉积有机物的稳定同位素组成及碳氮比

Tab. 4 Stable isotope and molar C/N ratios of SOM from HTW and HSD in May the following year

| 水深/m depth | $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ | | $\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$ | | C/N | |
|---------------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|---------|---------|---------|
| | HTW | HSD | HTW | HSD | HTW | HSD |
| 2.5 | -21.2±0.3 | -21.1±0.4 | 1.0±0.3 | 1.0±0.2 | 5.7±0.1 | 5.5±0.1 |
| 3.0 | -21.2±0.3 | -21.2±0.3 | 1.2±0.2 | 1.5±0.2 | 6.0±0.2 | 5.7±0.3 |
| 3.5 | -21.2±0.4 | -21.2±0.2 | 1.5±0.2 | 1.5±0.2 | 5.8±0.2 | 6.1±0.2 |
| 4.0 | -21.1±0.4 | -21.4±0.4 | 1.4±0.1 | 1.6±0.2 | 5.7±0.3 | 5.7±0.3 |

实验数据表明, 在大型海藻凋亡期(7月) HTW和HSD SOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 空间差异显著, 都随着水深的增加而减少, 且HTW不同水深SOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值都大于HSD(图2)。在大型海藻生长期(10月)与茂盛期(5月), HTW和HSD不同水深SOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 空间变化不明显。SOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在时间差异, HTW在7月、10月和翌年5月的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值分别为 -18.1‰ 、 -22.0‰ 和 -21.2‰ , HSD的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值分别为 -19.8‰ 、 -22.1‰ 和 -21.2‰ , 且7月>翌年5月>10月。

2.3 SOM C/N、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 之间的关系及潜在来源的值域范围

研究区域周围属于岛礁地理环境且离人类生活区较远, 短时间内可排除陆源植物碎屑和人类产生的陆源有机废水进入海藻场, 初步认为海藻场SOM是海源性有机物来源, 海源性有机物来源包括大型海藻、POM和浮游植物等。在7月海藻场(HTW和HSD)SOM C/N比值(5.9~6.6)、 $\delta^{13}\text{C}$ 值($-20.3\text{‰} \sim -17.6\text{‰}$)和 $\delta^{15}\text{N}$ 值

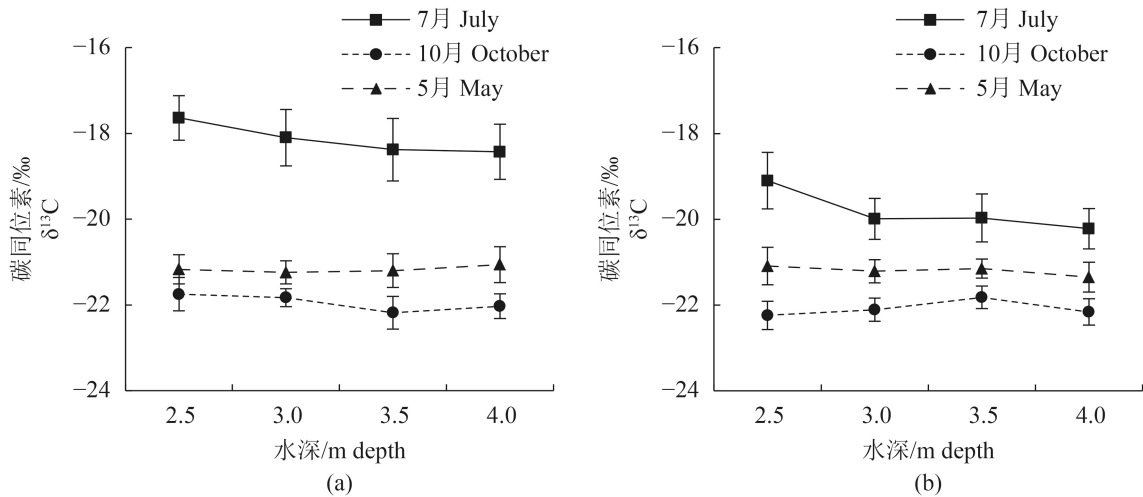


图 2 在HTW(a)和HSD(b)沉积有机物的 $\delta^{13}C$ 值分布

Fig. 2 The distribution of $\delta^{13}C$ of SOM from HTW (a) and HSD (b)

(2.3‰~3.4‰)包含在潜在来源(大型海藻、POM和浮游植物)的值域端元范围之内,这表明SOM有3种主要来源,即大型海藻、浮游植物和POM(图3)。已知海藻场POM主要来源于浮游植物,所以本研究认为7月海藻场SOM主要来源于大型海藻和浮游植物的混合贡献。10月和翌年5月的海藻场(HTW和HSD)SOM $\delta^{13}C$ 平均值分别为-22.0‰和-21.2‰,它们与浮游植物的 $\delta^{13}C$ 值-20.2‰更接近,而远离于大型海藻组的 $\delta^{13}C$ 值-16.4‰,所以本研究认为10月和翌年5月海藻场SOM主要来源于浮游植物的贡献。

2.4 大型海藻对SOM的贡献

$\delta^{13}C$ 化学性质相对保守,而 $\delta^{15}N$ 在迁移转化过程中变化显著,所以本研究运用碳稳定同位素

对SOM来源进行定量估算。在7月HTW和HSD SOM主要来源于大型海藻和浮游植物的混合贡献,可用碳稳定同位素质量平衡混合模型计算大型海藻对SOM的贡献:

$$X = f_t X_t + f_m X_m$$

式中: X , X_t , X_m 分别代表SOM、浮游植物(-20.2‰)和大型海藻(-16.4‰)的 $\delta^{13}C$ 值, f_t 和 f_m 分别代表浮游植物和大型海藻的贡献率。

结果表明,在7月HTW和HSD大型海藻对SOM的贡献范围分别为46.09%~66.67%和0.79%~28.65%,均值分别为53.71%和10.23%,2个区大型海藻对SOM的贡献率都随着水深增加而减少,且不同水深大型海藻对HTW的贡献率远大于HSD(图4)。在10月和翌年5月的海藻场(HTW和HSD)SOM $\delta^{13}C$ 值范围分别为-22.3‰~

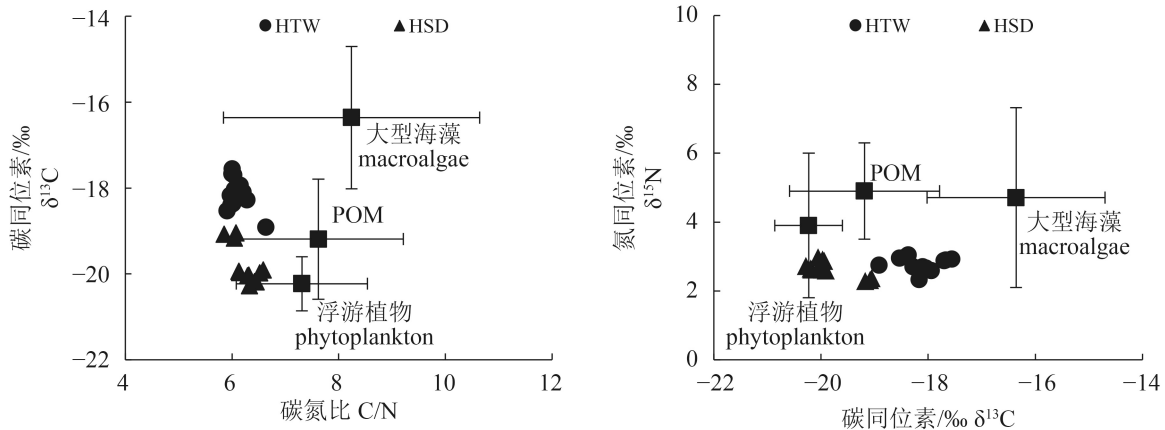


图 3 7月海藻场沉积有机物的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 、C/N比值之间的关系

Fig. 3 Relationship between $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$, C/N ratios of SOM from seaweed bed in July

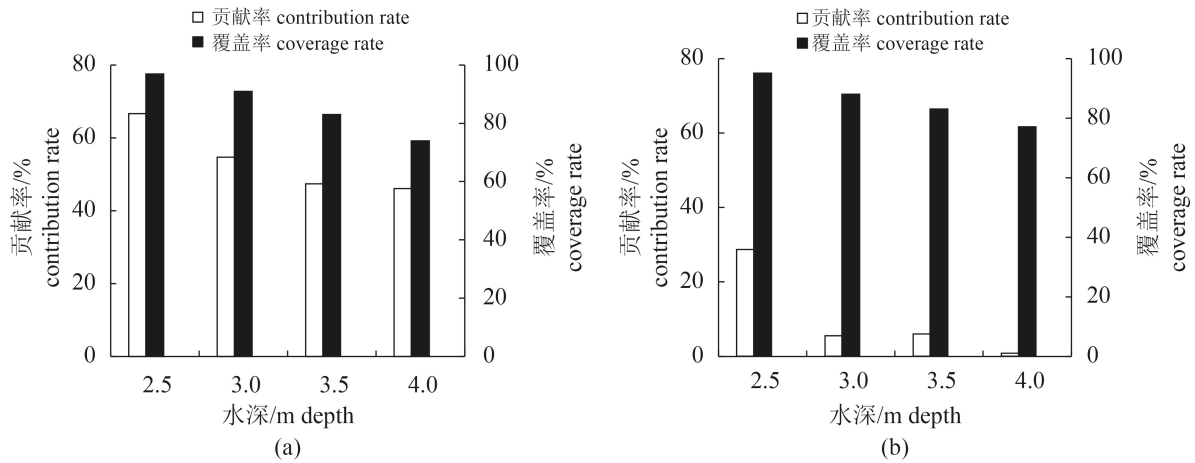


图 4 HTW(a)和HSD(b)不同深度大型海藻的覆盖率和贡献率

Fig. 4 Contribution rate and coverage of macroalgae at different depth from HTW (a) and HSD (b)

-21.7‰和-21.4‰~-21.0‰, 分别与浮游植物的δ¹³C值域相比较, 10月海藻场SOM 92%以上来源于浮游植物的贡献, 翌年5月海藻场SOM 95%以上来源于浮游植物的贡献。

3 讨论

3.1 海藻场SOM的来源

陆源植物碎屑和陆源有机废水的δ¹³C值分别为-26.5‰~-22.4‰和-28.1‰~-25.5‰^[17], 远离子本研究的浮游植物、大型海藻组和SOM的δ¹³C值, 不与它们的δ¹³C值域发生重叠, 可排除陆源植物碎屑和陆源有机废水的潜在来源。本实验中, 7月HTW和HSD SOM C/N平均比值范围分别为6.0~6.4和6.0~6.5, 10月HTW和HSD SOM C/N平均比值范围分别为6.2~6.6和6.4~6.7, 翌年5月HTW和HSD SOM C/N平均比值范围分别为5.7~6.0和5.5~6.1, 3个时期的C/N比值都小于8。SOM C/N比值常用来指示是海洋植物源还是陆地植物源, 藻类的C/N为4~10, 而陆源脉管植物体内含有大量纤维素成分, 其C/N比值通常高于20, 这种差别主要是由于藻类中缺少纤维素, 而蛋白质含量高, 其脉管植物则相反^[21-22]。研究认为SOM中C/N比值小于8为典型的海洋性有机物, 而大于12为陆源性有机物^[9], 该结论与本研究认为海藻场SOM是海洋性有机物来源相吻合。海藻场中海源性SOM来源包括大型海藻、POM和浮游植物。有研究枸杞岛海藻场浮游植物在春夏季和秋冬季的δ¹³C均值分别为-20.0‰±0.7‰和-20.2‰±0.4‰, POM在春夏季和秋冬季

的δ¹³C均值分别为-20.6‰±0.3‰和-21.1‰±0.8‰, 认为浮游植物和POM季节差异不明显, 且POM主要来源于浮游植物^[23-24]。该研究结果与本研究认为海藻场POM主要来源于浮游植物相吻合。因此, 本研究区域的海藻场SOM是大型海藻和浮游植物的混合贡献。

3.2 大型海藻不同生活史阶段对SOM组成的影响

在枸杞岛海藻场中铜藻是绝对优势种, 其生物量高达同期海藻场总生物量的80%以上, 铜藻在整个生命史中生物结构发生的凋亡和脱落对于海藻场SOM补充影响巨大, 并不断进入相应的食物链中, 成为海藻场对生物资源养护功能的物质基础^[24-26]。铜藻的δ¹³C值(-15.9‰±1.0‰)相比于其他大型海藻更接近于SOM的δ¹³C值, 铜藻对SOM的贡献扮演更重要的角色。

大型海藻的腐烂分解研究发现, 在水温15℃时异养微生物将藻体碎屑腐烂分解至消失的时间跨度可长达6~70 d^[27]。枸杞岛铜藻通常在6月初开始衰退凋亡, 从6月到7月铜藻已发生一个多月时间的凋亡和分解。本研究中7月处于大型海藻凋亡期, SOM的δ¹³C均值(-18.9‰)更接近于大型海藻组的δ¹³C值(-16.4‰), 所以产生大量的由大型海藻碎屑组成的SOM。铜藻叶片长度和宽度的均值在9月达到第一个极大值, 而在10月却出现一个明显的极小值, 但长大的叶片不可能再变小, 这样的变化说明铜藻新老叶片发生了更新替换, 老的叶片会衰老凋亡, 再有新的叶片生长补充^[25, 28]。本研究中10月和翌年5月

处于大型海藻的生长期和茂盛期,其SOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值分别为 -22.0‰ 和 -21.2‰ ,它们与7月(-18.9‰)相比远离于大型海藻组的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值(-16.4‰),随着大型海藻生长成熟,会发生自身部位结构的更新替换,也会产生藻体有机碎屑,但是产生由大型海藻碎屑组成的SOM和7月相比较少。

3.3 水动力强度等因素对SOM组成的影响

在2014年5月运用BioSonics DT-X回声探测仪环岛扫描和潜水采样调查,HTW和HSD大型海藻平均覆盖率分别为86.25%和85.75%,且2个区覆盖率都随着水深的增加而减少;在大型海藻凋亡期(7月)HTW和HSD的贡献率也都随着水深的增加而减少,且HTW不同水深大型海藻对SOM的贡献率远大于HSD(图4)。大型海藻覆盖率的大小在一定程度上可以表征大型海藻的生物量高低,HTW和HSD大型海藻的覆盖率差异不明显,即覆盖率相差0.5%,说明2个区大型海藻的生物量也差异不大。在大型海藻凋亡期(7月)HTW和HSD大型海藻对SOM的平均贡献率分别为53.71%和10.23%,2个区与其大型海藻平均覆盖率相比较,表明2个区除了部分大型海藻碎屑沉积下来,其余32.54%和75.52%数量的大型海藻碎屑通过外力作用而流失了,且HSD的流失远大于HTW。在大型海藻凋亡期(7月),采集沉积物的沉积时间为10 d,HTW和HSD的日平均沉积量分别为970和700 g/m^2 ,已知2个区大型海藻的覆盖率差异不大并且在短时间内人类活动影响都有限,然而造成2个区沉积量的差异,必然是HSD的水动力强度大于HTW。在7月对HTW和HSD的潮流进行观测,其流速变化范围分别为20~90和20~120 cm/s ,说明HSD的水动力强度大于HTW^[15]。因此,本研究认为造成HTW和HSD在不同水深大型海藻贡献率的差异,可能是不同水深大型海藻覆盖率的影响;造成HTW大型海藻贡献率远大于HSD,可能是水动力强度的影响。

4 结论

本研究运用碳氮稳定同位素技术,分析了枸杞岛北部海藻场代表性区域HTW和HSD的SOM来源及其占比,结果表明,该海藻场SOM属典型的海源性来源,其数量、组成及来

源等与大型海藻不同生活史阶段的藻体碎屑发生量、波浪等海域动力环境等具有相关性。大型海藻对SOM的贡献随着大型海藻处于不同的生活史阶段而变化,其规律为凋亡期7月>生长期10月>茂盛期翌年5月;在大型海藻碎屑发生量最多的凋亡期7月,2个区大型海藻对SOM的平均贡献率分别为53.71%和10.23%,而在大型海藻碎屑发生量最小的茂盛期翌年5月,此期间的SOM 95%以上来源于浮游植物的贡献。SOM总量与来源组成在水平空间上的差异性、各区域在水深方向上的变化梯度等,与海域的水动力强度和大型海藻覆盖率有关;同样在凋亡期7月,在2个区大型海藻覆盖率差异不大的前提下,波浪较弱的HTW的沉积量为970 g/m^2 ,其中大型海藻平均贡献率为53.71%,显著高于波浪较强的HSD的700 g/m^2 和10.23%;同时,大型海藻对SOM的贡献率随水深增加而减少的程度,在HTW要大于HSD。但是,波浪等海域水动力要素和大型海藻覆盖率各自对海藻场SOM的总量和来源组成产生的影响、数量关系,以及这些SOM参与当地生态系统生物地化循环的形态和比例尚待进一步研究。

上海海洋大学赵静、赵旭、徐胜南、邓明星、曾旭、陈玲、邹敏和刘雨蒙等在完成本文的过程中给予了很好的建议和意见,在此特表谢忱。

参考文献:

- [1] 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.
- [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[J]. *Botanica Marina*, 1995, 38(3): 227-237.
- [3] 毕远新,章守宇,吴祖立. 枸杞岛铜藻种群分布的季节变化[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1255-1259.
Bi Y X, Zhang S Y, Wu Z L. Seasonal variations of *Sargassum horneri* distribution around Gouqi Island of East China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(5): 1255-1259(in Chinese).
- [4] Harrison M A, Smith S D A. Cross-shelf variation in the

- structure of molluscan assemblages on shallow, rocky reefs in subtropical, eastern Australia[J]. *Marine Biodiversity*, 2012, 42(2): 203-216.
- [5] Barros F, Underwood A J, Lindegarth M. The influence of rocky reefs on structure of benthic macrofauna in nearby soft-sediments[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, 52(2): 191-199.
- [6] Reichstein M, Bahn M, Mahecha M D, *et al.* Linking plant and ecosystem functional biogeography[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(38): 13697-13702.
- [7] 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): 369-382.
- [8] 吴祖立, 章守宇, 陈彦, 等. 枸杞岛海藻场大型底栖无脊椎动物摄食类群研究[J]. *水产学报*, 2015, 39(3): 381-391.
- Wu Z L, Zhang S Y, Chen Y, *et al.* Analysis of functional feeding groups of macroinvertebrates communities in the macroalgae beds of Gouqi Island, Zhejiang Province[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(3): 381-391(in Chinese).
- [9] 赖建平. 鄱阳湖区悬浮颗粒物和表层沉积物有机质碳、氮同位素研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- Lai J P. Study on stable carbon and nitrogen isotope of suspended particulate organic matter and surface sediment organic matter in Poyang Lake[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012(in Chinese).
- [10] 倪兆奎, 李跃进, 王圣瑞, 等. 太湖沉积物有机碳与氮的来源[J]. *生态学报*, 2011, 31(16): 4661-4670.
- Ni Z K, Li Y J, Wang S R, *et al.* The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4661-4670(in Chinese).
- [11] Wang L, Mackay A W, Leng M J, *et al.* Influence of the ratio of planktonic to benthic diatoms on lacustrine organic matter $\delta^{13}\text{C}$ from Erlongwan maar lake, northeast China[J]. *Organic Geochemistry*, 2013, 54: 62-68.
- [12] 刘敏, 侯立军, 许世远, 等. 长江口潮滩有机质来源的 C、N 稳定同位素示踪[J]. *地理学报*, 2004, 59(6): 918-926.
- Liu M, Hou L J, Xu S Y, *et al.* Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers to source organic matter in the Yangtze Estuary[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 918-926(in Chinese).
- [13] 唐艳凌, 章光新. 基于稳定同位素示踪的流域颗粒有机物质来源辨析[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(9): 1257-1267.
- Tang Y L, Zhang G X. Identifying sources of particles organic matter in surface water based on stable isotope tracing on basin scale[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(9): 1257-1267(in Chinese).
- [14] 吴莹, 张经, 张再峰, 等. 长江悬浮颗粒物中稳定碳、氮同位素的季节分布[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(5): 546-552.
- Wu Y, Zhang J, Zhang Z F, *et al.* Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope of suspended particulate matter in the Changjiang River[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 546-552(in Chinese).
- [15] 王蕾. 枸杞岛海藻场生态系统与鱼类群落季节变化的关系[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
- Wang L. Relationship between ecosystem of kelp beds and seasonal variation of fish assemblages at waters around Gouqi Island[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011 (in Chinese).
- [16] 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.
- [17] 郑新庆, 黄凌风, 杜建国, 等. 筲箕湖绿潮期间颗粒有机物及沉积有机物的来源研究[J]. *海洋学报*, 2013, 35(5): 102-111.
- Zheng X Q, Huang L F, Du J G, *et al.* The source of particulate organic matter and sedimentation organic matter during macroalgal bloom Yundang Lagoon[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(5): 102-111(in Chinese).
- [18] Anderson W T, Fourqurean J W. Intra-and interannual variability in seagrass carbon and nitrogen stable isotopes from south Florida, a preliminary study[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(2): 185-194.
- [19] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions[J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 703-718.
- [20] 蔡德陵, 李红燕. 稳定碳、氮同位素在河流系统研究中的应用[J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(2): 225-232.

- Cai D L, Li H Y. Application of stable carbon and nitrogen isotopes to the study of riverine system[J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(2): 225-232(in Chinese).
- [21] 张凌, 陈繁荣, 殷克东, 等. 珠江口及近海表层沉积有机质的特征和来源[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(1): 98-103.
- Zhang L, Chen F R, Yin K D, *et al.* The characteristics and sources of surface sediments in the Pearl River Estuary and its adjacent shelves[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(1): 98-103(in Chinese).
- [22] Cloern J E, Canuel E A, Harris D. Stable carbon and nitrogen isotope composition of aquatic and terrestrial plants of the San Francisco Bay estuarine system[J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(3): 713-729.
- [23] 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 the offshore food web of Gouqi Island[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 33(4): 930-938(in Chinese).
- [24] Maksymowska D, Richard P, Piekarek-Jankowska H, *et al.* Chemical and isotopic composition of the organic matter sources in the Gulf of Gdansk (Southern Baltic Sea)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 51(5): 585-598.
- [25] 陈亮然, 章守宇, 陈彦, 等. 枸杞岛马尾藻场铜藻的生命史与形态特征[J]. *水产学报*, 2015, 39(8): 1218-1229.
- Chen L R, Zhang S Y, Chen Y, *et al.* Life history and morphology of *Sargassum horneri* from the *Sargassum* seaweed bed of Gouqi Island[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(8): 1218-1229(in Chinese).
- [26] 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.
- [27] Smith S V. Marine macrophytes as a global carbon sink[J]. *Science*, 1981, 211(4484): 838-840.
- [28] 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.

Identifying sources of sedimentary organic matter in the rocky reef seaweed bed

WU Chenghong^{1,2}, ZHANG Shouyu^{1*}, ZHOU Xijie¹, WANG Kai¹, CHEN Liangran¹

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

2. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 571126, China)

Abstract: Sedimentary organic matter (SOM) in seaweed beds provides an important material foundation for implementing seaweed bed ecosystem services. In this study, SOM samples were collected from the seaweed bed in northern Gouqi Island during the death period in July 2014, growth period in October 2014, and bloom period in May 2015, in accordance with three macroalgal life history stages: germinate and grow, mature and bloom, and decay and die. The sources and variations of the SOM were determined by carbon and nitrogen stable isotope analysis using the molar carbon-to-nitrogen (C/N) ratio and stable isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) as indicators. The results showed the following. 1) The molar C/N ratios of the SOM varied in the ranges of 5.9–6.6, 6.0–6.9, and 5.4–6.2 in July, October, and the following May, respectively, indicating a typical marine source of SOM from the seaweed bed. 2) The $\delta^{13}\text{C}$ values of the SOM were significantly different at the various water depths in July (–20.3‰ to –17.6‰); however, no significant changes were found in October (–22.3‰ to –21.7‰) or in May of the following year (–21.4‰ to –21.0‰). 3) The $\delta^{13}\text{C}$ values of the SOM showed temporal variations, whereas spatial variations with water depth were found in July. 4) According to the relations among the $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, and C/N, the SOM was mainly derived from the mixed contribution of phytoplankton and macroalgae in July, and it was attributed to the contribution of phytoplankton in October and the following May. 5) In July, macroalgae, on average, contributed up to 53.71% of the SOM from the seaweed bed, as estimated by the carbon stable isotope mass-balance mixing model. 6) The proportion of macroalgal detritus in the SOM was significantly affected by waves, among the various hydrodynamic factors in the marine environment.

Key words: seaweed bed; SOM; sources; contribution rate

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

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (41176110, 41406153); Special Fund for Agro-Scientific Research in the Public Interest (201303047)