



## 南日岛养殖海带的生长、碳氮磷元素含量及对海水颗粒和溶解有机物的影响

陈思旺, 许凯, 王文磊, 徐燕, 陈昌生, 谢潮添, 纪德华\*

(集美大学水产学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为了研究养殖海带的生态环境效应, 通过南日岛海带养殖区现场测量和取样, 分析了海带的生长速率, 组织 C、N、P 含量和元素比值, 以及养殖区颗粒和溶解有机物的季节变化。结果显示, 在 1 个生长周期内, 海带的湿重与长度呈明显幂函数关系 ( $W=0.02 L^{7.57}$ ,  $R^2=0.84$ ), 海带的湿重、长度和宽度与养殖天数具有明显的线性相关关系 (湿重、长度和宽度与养殖天数的  $R^2$  分别为 0.96、0.96 和 0.93)。海带 C/N 比变化范围为 9.13~18.66, N/P 比变化范围为 11.32~18.48, C/P 比变化范围为 153.18~267.99。海带 C/P 比与 P 含量呈明显指数函数关系 ( $Y=748.30 e^{-4.10X}$ ,  $R^2=0.88$ ), C/N 比与 N 含量呈明显指数函数关系 ( $Y=50.21 e^{-0.60X}$ ,  $R^2=0.92$ )。海带养殖海区 POC、PON 和 POP 的变化范围分别为 0.33~0.86、0.07~0.11 和 0.01~0.02 mg/L; DOC、DON 和 DOP 含量的变化范围分别为 1.98~17.06、0.20~0.55 和 0.01~0.04 mg/L。海带 C、N、P 含量的变化范围分别为 22.82%~26.43%、1.65%~2.97% 和 0.25%~0.42%。收获时海带的平均碳、氮、磷含量分别为 26.17%、1.76% 和 0.29%, 以 2018 年福建海带养殖总产量 76.83 万 t 计算, 即通过收获分别可移除 C、N、P 20.13、1.35 和 0.22 万 t。研究表明, 养殖海带可能是养殖区海水有机物的重要来源, 是近海碳循环的重要组成之一。

**关键词:** 海带; 生长; 碳氮磷; 颗粒有机物; 溶解有机物; 生态环境功能; 南日岛

**中图分类号:** S 968.4

**文献标志码:** A

大型海藻生物修复理论研究始于 20 世纪 70 年代, 到了 90 年代, 国内外学者开始将大型海藻生物修复研究扩展至开放海域<sup>[1-2]</sup>。进入 21 世纪以来, 有关大型海藻与海洋环境关系的研究成为海洋生态与环境生物学的研究热点。大型海藻吸收水体中的 C、N、P 元素转化为藻类自身生物量, 具有提高溶解氧含量、调节水体 pH 值等作用, 又可以为海洋生物提供栖息场所。因此, 养殖大型海藻是净化水质、防控海域富营养化和有害藻华、提高海域利用率和改善海洋环境的有效措施<sup>[3-4]</sup>。

海带 (*Saccharina japonica*) 是我国产量最高的经济藻类, 是一种冷水性海藻, 原先仅在我国山东、辽宁等北方沿海地区养殖。1956 年开始的海带南移养殖工作, 使得海带在福建、浙江等南方沿海地区养殖成功, 21 世纪初期耐高温养殖品种的选育和应用进一步扩大了南方海带养殖规模。2018 年福建省海带产量约占全国海带总产量的 50.45%<sup>[5]</sup>, 但关于其生态功能的研究少有报道。2018 年福建省海带养殖面积约 2.04 万  $hm^2$ , 产量为 76.83 万 t<sup>[5]</sup>, 是福建省海洋渔业经济的重点养殖品种。为了研究海带养殖

收稿日期: 2019-08-22 修回日期: 2020-01-05

资助项目: 福建省种业计划项目 (2017FJSCZY01); 现代农业产业技术体系专项 (CARS-50); 蓝色粮仓重点研发子任务 (2018YFD0900702)

通信作者: 纪德华, E-mail: dhji@jmu.edu.cn

在近海水养殖生态系统中的生态功能, 选择南日岛海带养殖区为研究对象。南日岛位于兴化湾口, 是福建省第三大岛, 其附近海域风浪小、水质好<sup>[6]</sup>。据2019年4月24日《福建莆田晚报》报道, 2018年南日岛大型海藻养殖面积达0.39万hm<sup>2</sup>, 海带产量达8.40万t, 约占福建省海带总产量的十分之一。

本研究通过海带养殖5个时期的现场测量和取样, 分析了南日岛海带养殖区的生化指标和海带的生理生化指标; 并研究了海带组织C、N、P含量和元素比值; 以及养殖区颗粒(POM)与溶解有机物(DOM)的季节变化。此外, 本研究将海带组织的元素比值与Redfield比值(C:N:P=106:16:1, 由Redfield首先发现, 是生物地球化学领域重要的定量依据)进行对比。目的是为了了解养殖海带在近海的生态环境效应, 为建立和完善海藻养殖对海洋环境的调节机制提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 现场实验

海带养殖区位于福建莆田南日岛(119°30'26"E, 25°10'49"N)。海带海上养殖从分苗到收获历时约100d。南日岛2019年海带下海养殖约开始于1月12日, 4月20日开始收获。

**海带生长的测定** 在海带集中养殖点(1km以内没有其他养殖物种)标记125棵海带, 每15~30d测定海带的长度和宽度。此外, 每15~30d随机选取5棵海带, 现场测定长度和湿重, 然后带回实验室分段烘干藻体, 用于组织C、N、P含量的测定。

**海带组织碳氮磷含量测定** 藻体用海水清洗干净, 冷藏保存运回实验室。取海带组织中部, 称量湿重, 然后在55℃下烘干48h至恒重, 计算含水率。干组织粉碎后置于恒温干燥器内备用。采用元素分析仪(elemental analyzer, Costech, USA)测定组织C、N含量, 组织P用改进的Solórzano L和Sharp法测定<sup>[7]</sup>。

### 1.2 养殖区海水样品测定

**取样时间与地点** 共取样5次, 其中2月和4月采样时均有雨, 5月采样时海带处于收获期, 养殖区海带收获完成一半左右。每次在养殖区内随机选取3个采样点, 采样点间隔500m

左右。用干净的2.5L白色塑料桶取表层海水, 4h内运回实验室进行处理分析。

**养殖区化学指标测定** 养殖区化学指标包括无机氮(NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N和NH<sub>3</sub>-N三氮之和)、活性磷酸盐(PO<sub>4</sub>-P)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素a(Chl. a)、无机碳(DIC)等环境因子。各测定项目的采集、保存和分析方法均按《海洋调查规范》<sup>[8]</sup>和《海洋监测规范》<sup>[9]</sup>中规定的有关方法进行。

**海水有机物测定** 养殖区海水颗粒物样品采用0.70μm GF/G玻璃纤维膜过滤收集, 每个水样过滤2份, 各100mL, 一张滤膜用于测定颗粒有机碳(POC)和颗粒有机氮(PON), 另一张测定颗粒有机磷(POP)。滤膜在55℃烘干后, 置于恒温干燥箱内冷藏备用。采用元素分析仪(elemental analyzer, Costech)测定POC、PON; 用改进的Solórzano L和Sharp法测定POP<sup>[7]</sup>。过滤后的水样用于测定溶解有机碳(DOC)、溶解有机氮(DON)和溶解有机磷(DOP), 置于-20℃保存直至分析。采用总有机碳分析仪(TOC5000A, Shimadzu)测定DOC; 总氮和无机氮的差值即为DON, 总磷和活性磷酸盐的差值即为DOP。

**颗粒物中有机碳的来源与定量分析** 在海带养殖区中, POC主要来自碎屑和浮游植物。本研究使用以下公式<sup>[10-11]</sup>估算海水浮游植物有机碳(OC<sub>phytoplankton</sub>, mg/L)和碎屑有机碳(OC<sub>detritus</sub>, mg/L):

$$OC_{\text{phytoplankton}} = \text{Chl.}a \times 60 \quad (1)$$

$$OC_{\text{detritus}} = POC - OC_{\text{phytoplankton}} \quad (2)$$

### 1.3 数据分析

使用Excel软件进行数据处理, 并使用SPSS 18.0软件中的单因素方差分析(One-Way ANOVA)进行数据分析。所有实验数据均以平均值±标准差表示。P<0.05被认为差异显著。

## 2 结果

### 2.1 养殖区化学指标

由于2月和4月采样期间均为雨天, 海水中的无机碳浓度显著低于其他时期(P<0.05, 表1)。但无机碳的变化趋势与氮磷营养的变化趋势不同。海带养殖区无机氮呈先上升后下降趋势, 浓度范围为0.06~0.29mg/L, 3月无机氮浓度最高(图1)。磷酸盐浓度变化范围为0.01~0.06mg/L, 1月磷

表 1 海带养殖区表层海水化学参数有机碳的季节变化

Tab. 1 Seasonal change of chemical parameters of surface seawater in *S. japonica* mariculture area

日期 date	溶解无机碳/ (mg/L) DIC	叶绿素 $a$ / ( $\mu\text{g/L}$ ) Chl. $a$	溶解有机碳/ (mg/L) DOC	颗粒有机碳/ (mg/L) POC	碎屑有机碳/ (mg/L) OC <sub>detritus</sub>	浮游植物有机碳/ (mg/L) OC <sub>phytoplankton</sub>
2019-01-12	20.26 $\pm$ 1.16 <sup>a</sup>	1.69 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	8.98 $\pm$ 2.10 <sup>a</sup>	0.44 $\pm$ 0.09 <sup>ab</sup>	0.34 $\pm$ 0.08 <sup>ab</sup>	0.10 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>
2019-02-21	13.75 $\pm$ 3.19 <sup>b</sup>	1.65 $\pm$ 0.29 <sup>a</sup>	9.43 $\pm$ 1.23 <sup>a</sup>	0.75 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	0.65 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	0.10 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>
2019-03-12	17.87 $\pm$ 1.74 <sup>ab</sup>	2.21 $\pm$ 0.17 <sup>b</sup>	17.06 $\pm$ 1.68 <sup>b</sup>	0.33 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	0.20 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	0.13 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>
2019-04-20	12.81 $\pm$ 0.27 <sup>b</sup>	2.05 $\pm$ 0.17 <sup>ab</sup>	17.06 $\pm$ 1.68 <sup>b</sup>	0.55 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	0.43 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	0.12 $\pm$ 0.01 <sup>ab</sup>
2019-05-26	18.29 $\pm$ 2.05 <sup>a</sup>	1.66 $\pm$ 0.17 <sup>a</sup>	1.98 $\pm$ 1.05 <sup>c</sup>	0.86 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>	0.76 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>	0.10 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>

注: 表中同一列数据中不同字母表示存在显著性差异( $P<0.05$ ), 下同

Notes: in same column, the different superscript letters of the same parameter denote significant difference between treatments ( $P<0.05$ ), the same below

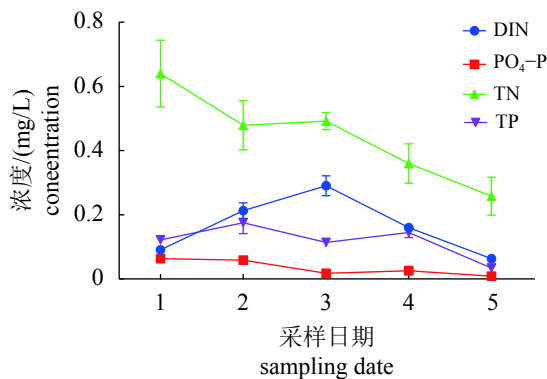


图 1 海带养殖区营养盐的季节变化

Fig. 1 Seasonal changes of nutrients in mariculture zone of *S. japonica*

1. 2019-01-12, 2. 2019-02-21, 3. 2019-03-12, 4. 2019-04-20, 5. 2019-05-26. The same as Fig. 3 and Fig. 5

酸盐浓度最高, 并呈下降趋势。总氮和总磷变化范围分别为 0.26~0.64 和 0.03~0.18 mg/L, 总氮下降趋势明显。海水中有机的变化趋势也与无机碳不同(表 1)。海水 Chl.  $a$  变化范围为 1.65~2.21  $\mu\text{g/L}$ , 3 月 Chl.  $a$  浓度最高, 2 月最低。海水中的 DOC 变化范围为 1.98~17.06 mg/L, 5 月 DOC 浓度最低。海水中的 OC<sub>phytoplankton</sub> 变化范围为 0.10~0.13 mg/L, 浓度相对稳定。海水中的 OC<sub>detritus</sub> 变化范围为 0.20~0.75 mg/L, 2 月和 5 月 OC<sub>detritus</sub> 显著高于其他 3 个月 ( $P<0.05$ ), 3 月最低。海水中的 POC 主要来源于 OC<sub>detritus</sub> 和 OC<sub>phytoplankton</sub>, 以 OC<sub>detritus</sub> 为主(表 1)。POC 与 OC<sub>detritus</sub> 的变化趋势相一致, 但二者的季节变化趋势不明显。此外, POC 与 OC<sub>phytoplankton</sub> 的变化趋势不一致。

## 2.2 海带的生长特性

在 1 个生长周期内(约 100 d), 海带的湿重、长度和宽度均与养殖天数呈线性正相关关系(图 2-a,

<https://www.china-fishery.cn>

图 2-b, 图 2-c), 可以用线性方程  $Y=aX+b$  表示。表明海带的湿重、长度和宽度随养殖天数的增加而增加。4 月下旬后海带逐渐开始收获, 4 月底海带收获时湿重为 (535.90 $\pm$ 123.50) g, 长度为 (197.88 $\pm$ 21.58) cm, 宽度为 (31.23 $\pm$ 3.86) cm, 记录最大长度为 235 cm, 最大宽度为 42 cm, 最大湿重为 842 g。在生长期, 海带湿重与长度呈幂函数关系, 幂值为 7.57, 表明海带湿重随着长度的增加而增加, 且湿重增加速率远快于长度的增加速率(图 2-d)。

## 2.3 海带组织碳氮磷含量的季节变化

组织 C 含量的变化范围为 22.82%~26.43% (平均值 24.87%), 3 月 C 含量较低, 4 月和 5 月 C 含量相对较高, 但季节变化趋势不明显(图 3-a)。N 含量变化范围为 1.65%~2.97% (平均值 2.16%), 1 月 N 含量显著高于其他时期 ( $P<0.05$ ), 随后, N 含量下降趋势明显 ( $P<0.05$ , 图 3-b)。P 含量变化范围为 0.23%~0.42% (平均值 0.32%), 2 月 P 含量显著高于其他时期 ( $P<0.05$ ), 但季节变化幅度不大(图 3-c)。海带组织 C/N 比变化范围为 9.13~18.66 (平均值 14.16), 均显著高于 Redfield C/N 比 (6.6), 且 C/N 比呈上升趋势 ( $P<0.05$ , 图 3-d)。海带组织 N/P 比变化范围为 11.32~18.48 (平均值 14.30), 1 月 N/P 比显著高于其他时期 ( $P<0.05$ ), 且略高于 Redfield N/P 比 (16), 其余月份 N/P 比均低于 16(图 3-e)。海带组织 C/P 比变化范围为 153.18~267.99 (平均值 197.89), 均远高于 Redfield C/P 比 (106)。4 月和 5 月的 C/N 和 C/P 比值显著高于其他 3 个月 ( $P<0.05$ , 图 3-d, 图 3-f)。收获时海带 C、N、P 含量平均为 26.17%、1.76% 和 0.29%。

海带组织 C/P 比与 P 含量呈明显指数函数

中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

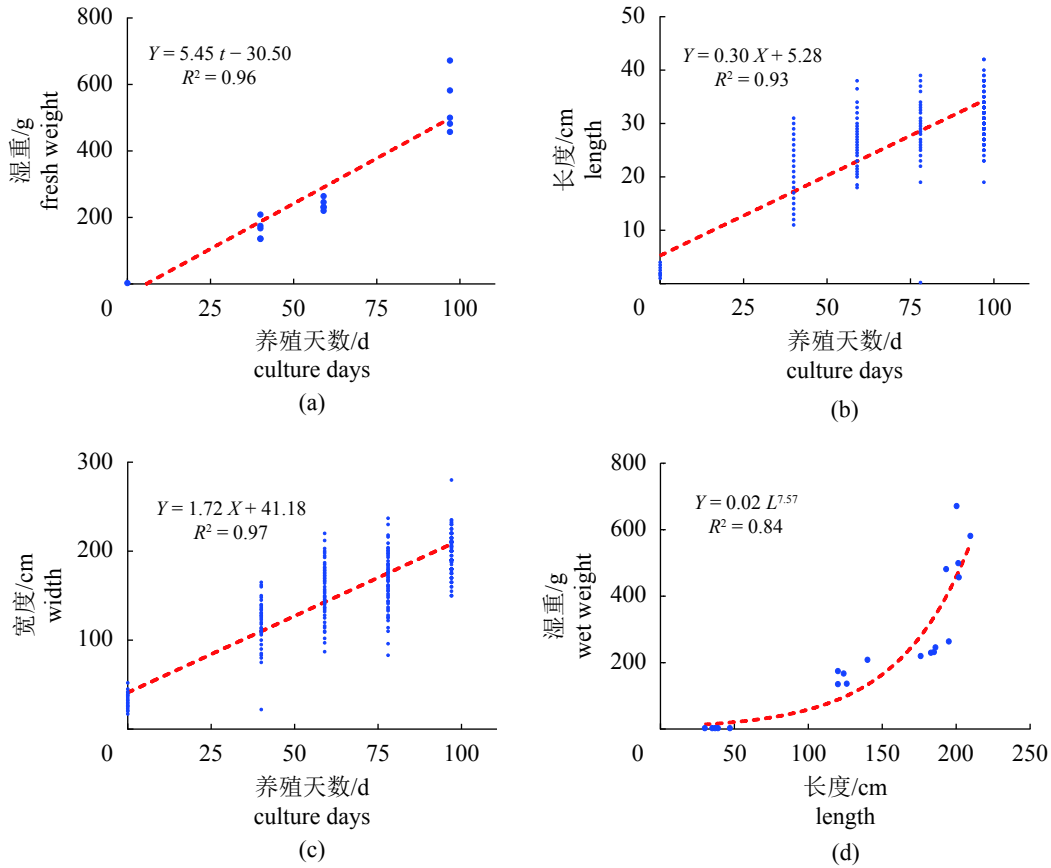


图 2 海带湿重 (a)、长度 (b)、宽度 (c) 与养殖天数的线性关系, 及湿重与长度 (d) 的幂函数关系

Fig. 2 Linear relationships between cultivation time and fresh weight (a), length (b), and width (c) of *S. japonica*, and power-function relationship between the fresh weight and the length (d)

关系, 随着组织 P 含量增加, 组织 C/P 比呈指数下降 ( $R^2=0.88$ , 图 4-a)。当 P 含量最低和最高值分别为 0.23% 和 0.45% 时, 组织 C/P 比分别约为 300 : 1 和 150 : 1。海带组织 C/N 比与 N 含量也呈明显指数函数关系, 组织 C/N 比随着组织 N 含量增加而呈指数下降 ( $R^2=0.92$ , 图 4-b)。当 N 含量的最低和最高值分别为 1.65% 和 3.21% 时, 组织 C/N 比分别约为 20 : 1 和 10 : 1。此外, 海带组织 N/P 比与组织 N、P 含量并无明显的线性相关关系 ( $R^2=0.09$ , 图 4-c;  $R^2=0.37$ , 图 4-d)。

### 2.4 养殖区颗粒和溶解有机物

采样调查期间, 养殖区表层海水的 POC 变化范围为 0.33~0.86 mg/L(平均值 0.59 mg/L), 3 月 POC 相对较低, 2 月和 5 月 POC 显著高于其他 3 个月 ( $P<0.05$ )(表 1, 图 5-a)。PON 变化范围为 0.07~0.11 mg/L, 1 月和 3 月 PON 相对较低, 2 月和 5 月 PON 显著高于其他时期 ( $P<0.05$ )(图 5-b)。POP 变化范围为 0.01~0.02 mg/L, 5 月 POP 最低, 但季节变化趋势不显著 ( $P>0.05$ )(图 5-c)。POC 和

PON 的变化趋势一致, 但与 POP 的变化趋势不一致。

养殖区表层海水的 DOC 变化范围为 1.98~17.06 mg/L, 5 月养殖区海带收获一半后, DOC 最低值仅为 1.98 mg/L( $P<0.05$ )(图 5-d); 而 1—4 月 DOC 相对较高, 其中 4 月最高为 17.06 mg/L, 5 月 DOC 约为 4 月 DOC 的 1/9, 显著低于其他时期 ( $P<0.05$ )(图 5-d)。DON 变化范围为 0.20~0.55 mg/L, 1 月 DON 显著高于其他时期 ( $P<0.05$ ), 而 2—5 月 DON 差异不显著 ( $P>0.05$ )(图 5-e)。DOP 变化范围为 0.01~0.04 mg/L, 5 月 DOP 显著低于其他时期 ( $P<0.05$ )(图 5-f)。DOC 与 DON、DOP 三者的变化趋势都不一致。

养殖区颗粒有机物的 C/N 比变化范围为 5.75~8.95(平均值 7.28, 表 2), 5 月 C/N 比相对较高, 季节变化幅度不明显, 除了 3 月 C/N 比略低于 Redfield C/N 比 (6.6), 其余月份 C/N 比接近于或略高于 6.6。颗粒有机物的 N/P 比变化范围为 11.66~51.30(平均值 22.00), 5 月 N/P 比显著高于



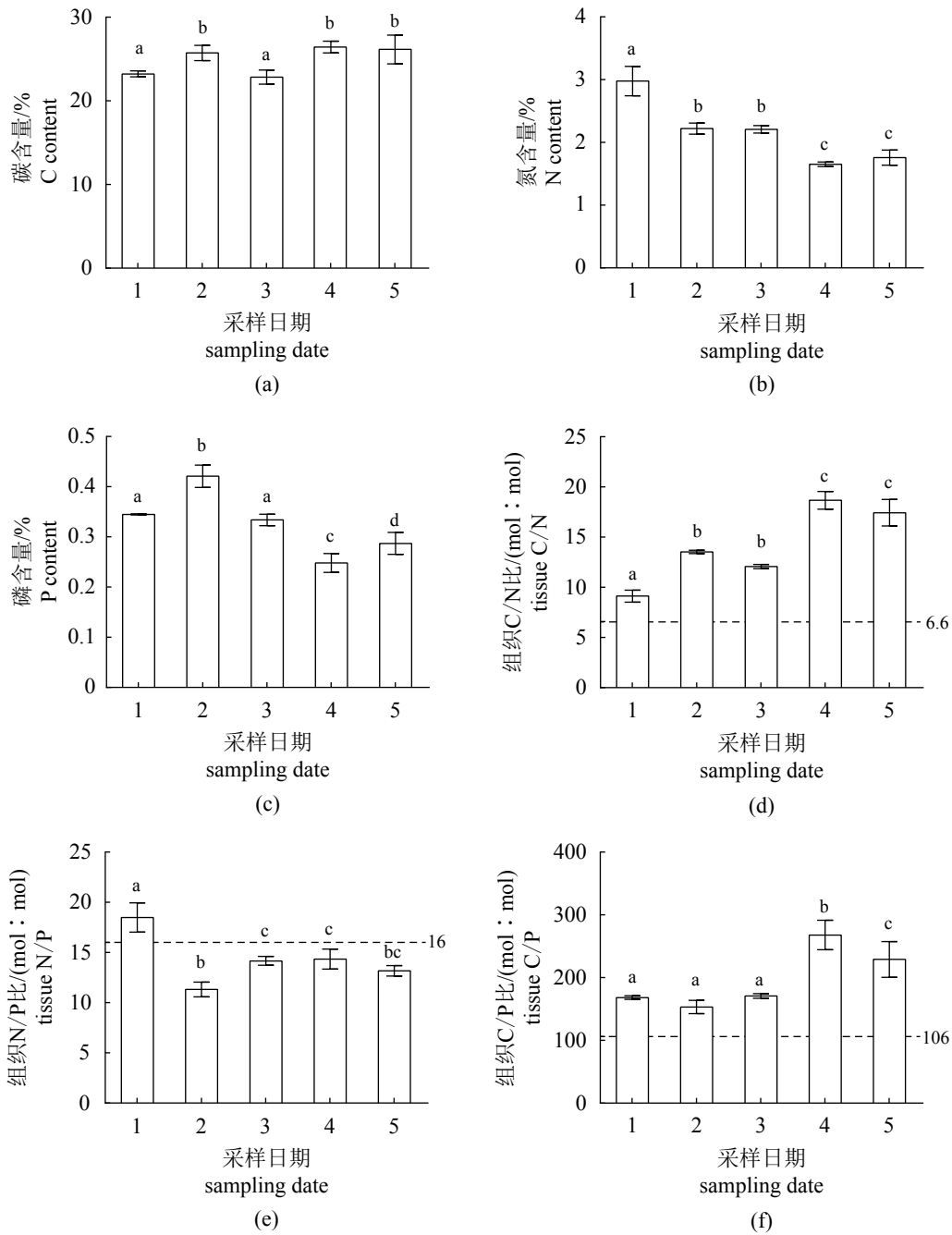


图3 海带干组织碳氮磷含量及元素比的季节变化

虚线表示 Redfield C : N : P 比值为 106 : 16 : 1, 图中不同字母表示存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 下同

Fig. 3 C, N, and P contents and molar ratios of *S. japonica* tissues in different seasons

The dash lines showed the Redfield ratio (C : N : P=106 : 16 : 1), different superscript letters of the same parameter denote significant difference between treatments ( $P < 0.05$ ), the same below

其他时期 ( $P < 0.05$ ), 且远远高于 Redfield N/P 比 (16), 其余月份 N/P 比较接近于 16。颗粒有机物的 C/P 比变化范围为 92.87~456.65, 5月 C/P 比显著高于其他时期 ( $P < 0.05$ ), 远高于 Redfield C/P 比 (106), 但其余月份 C/P 比略低于或接近于 106,

并且差异不显著 ( $P > 0.05$ )(表 2)。

养殖区溶解有机物的 C/N 比变化范围为 11.41~102.40, 均远大于 Redfield C/N 比 (6.6), 4月 C/N 比显著高于其他时期 ( $P < 0.05$ ), 5月 C/N 比最低, 约为 4月 C/N 比的 1/9, 季节变化趋势明显。溶

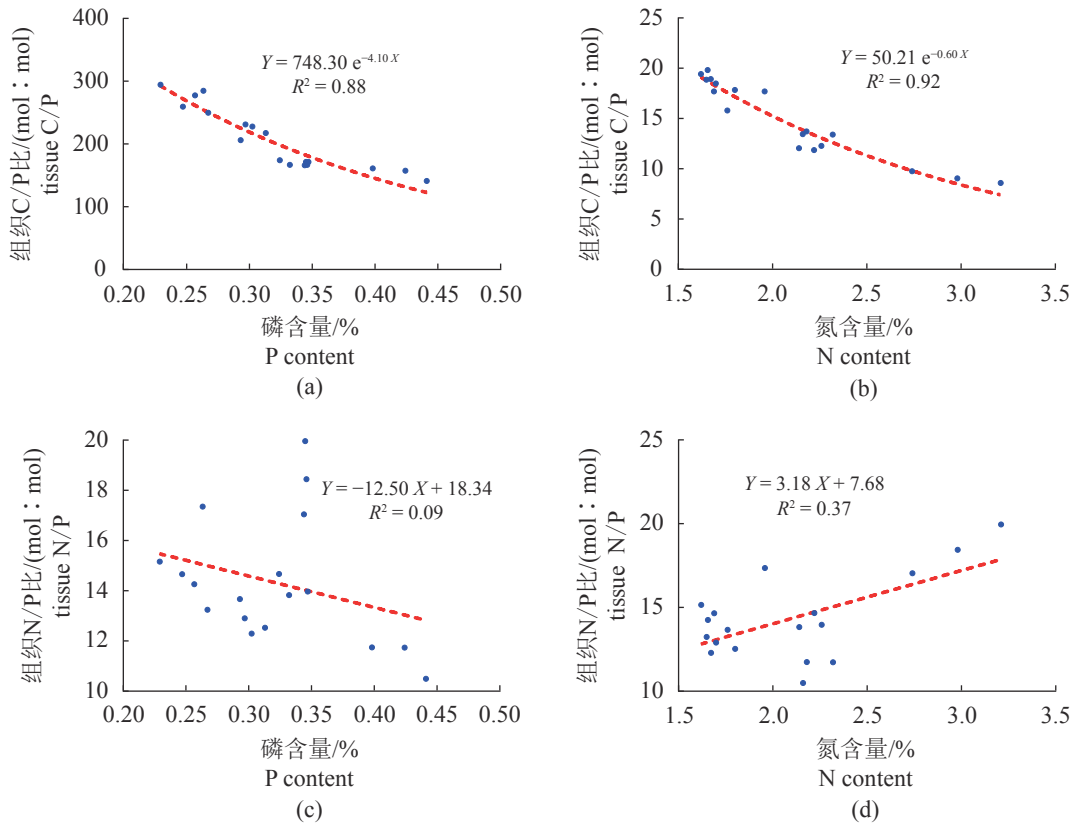


图 4 海带组织氮磷含量与组织元素比的相关性

Fig. 4 Relationships between nutrient contents (% dry weight) and nutrient molar ratios in *S. japonica* tissues

解有机物的 N/P 比变化范围为 14.33~62.97, 1 月和 5 月 N/P 比显著高于其他时期 ( $P < 0.05$ ), 且远远高于 Redfield N/P 比 (16), 其余月份 N/P 比均接近于 16, 并且差异不显著 ( $P > 0.05$ )。溶解有机物的 C/P 比变化范围为 585.63~1673.21, 均远高于 Redfield C/P 比 (106), 且 5 月 C/P 比最低, 4 月 C/P 比显著高于其他时期 ( $P < 0.05$ ) (表 2)。

### 3 讨论

#### 3.1 海带的生长

海带是我国产量最高的经济藻类, 而福建省海带产量占全国总产量的一半左右。海带是一种冷水性海藻, 南日岛海水温度在 4 月中下旬逐渐升高至 20 °C, 因此养殖海带一般在 4 月下旬开始收获。本研究发现, 分苗时海带湿重和长度分别约 3 g、25 cm, 收获时海带的平均湿重和长度分别为 535.90 g、197.88 cm。养殖阶段海带湿重和长度的平均生长速率分别约为 5.35 g/d、1.75 cm/d。南日岛海带长度的平均生长速率小于北方桑沟湾海带养殖区 (1.95 cm/d), 并且南日岛

海带湿重的平均生长速率只是桑沟湾海带 (7.50 g/d) 的 71% 左右。南日岛海带收获时的湿重和长度均小于已报道的北方养殖的海带<sup>[12-13]</sup>。

#### 3.2 海带可移出的碳氮磷

人工养殖的大型海藻是近海生态系统的重要初级生产者, 通过光合作用和营养盐的支持可以产生很高的生产力<sup>[14]</sup>。海带在进行光合作用过程中直接吸收海水中的 CO<sub>2</sub>, 有利于大气中的 CO<sub>2</sub> 向海水中扩散, 相当于间接减少了大气中的 CO<sub>2</sub>, 被称为最具潜力的生物净化器。南日岛海带组织 C 含量变化范围为 22.82%~26.43% (平均 24.87%), 与之前报道的北方荣成市桑沟湾海带组织 C 含量相接近<sup>[13]</sup>。收获时海带平均的 C 含量为 26.17%, 以 2018 年福建省海带养殖产量 76.83 万 t 计算, 2018 年通过收获移除 20.13 万 t 碳。有研究表明寒带和温带原始森林、未受干扰林和老熟林的碳固定速率平均为 0.40 t C/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[15]</sup>。基于北方海带研究和 2018 年渔业年鉴数据<sup>[5]</sup> 计算表明, 海带每年在海上的实际养殖时间约为 100 d, 即使按 1 年计并且只考虑可收获生物量,

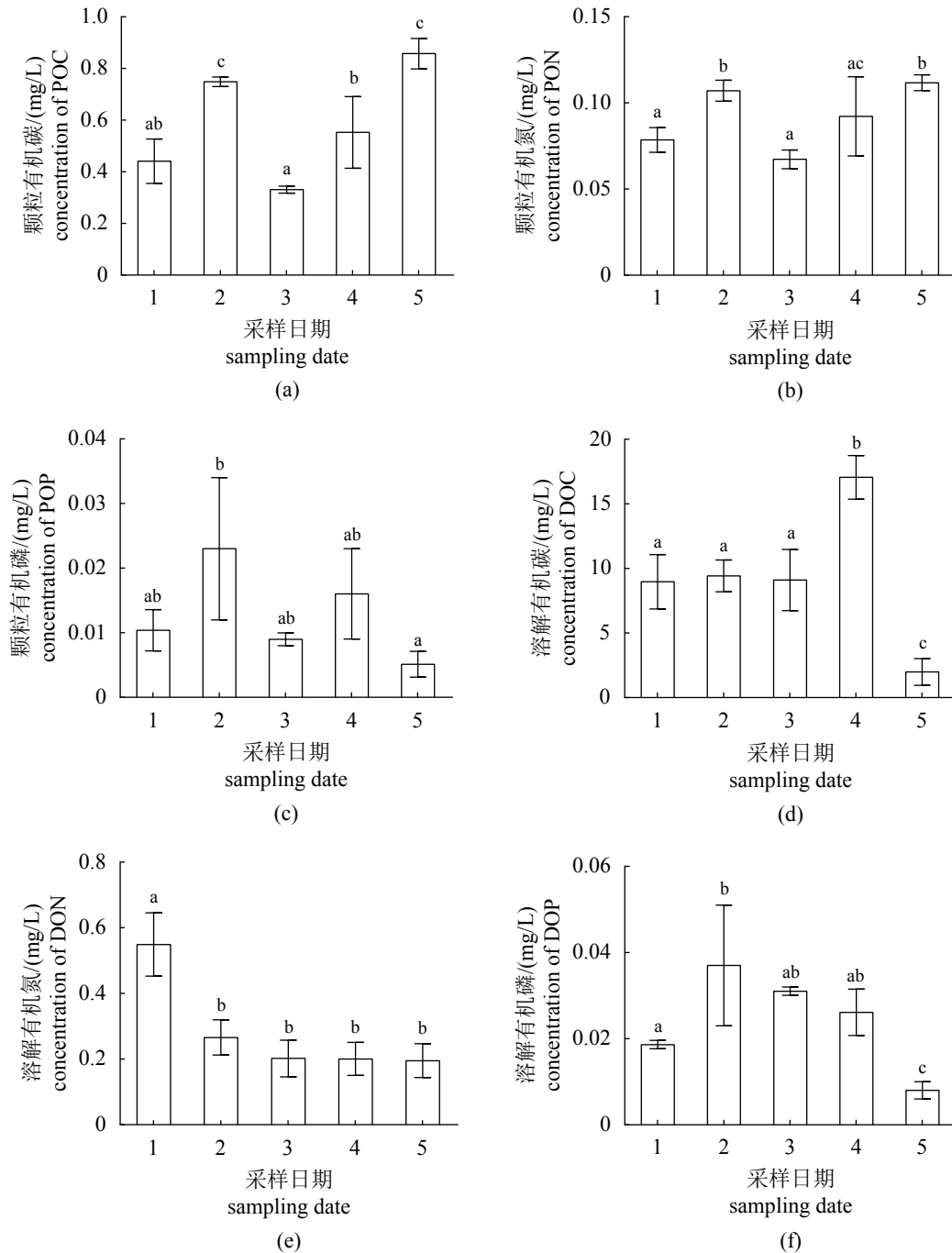


图 5 海带养殖区颗粒和溶解有机物的季节变化

Fig. 5 Seasonal variations of POM and DOM in *S. japonica* mariculture zone

养殖海带的年初级生产力约为森林的 10 倍<sup>[12]</sup>。南日岛海带组织 N、P 含量变化范围分别为 1.65%~2.97%(平均 2.16%)、0.25%~0.42%(平均 0.32%)，与之前报道的烟台四十里湾海带组织 N、P 含量相接近<sup>[16]</sup>。收获时海带平均的 N、P 含量分别为 1.76% 和 0.29%，以 2018 年福建省海带养殖产量 76.83 万 t 计算，2018 年通过收获分别移除 1.35 万 t 氮和 0.22 万 t 磷。

### 3.3 养殖区溶解和颗粒有机碳

DOC 和 POC 是海水中主要的有机碳存在形式。国内外科研人员围绕大型海藻碳汇强度的测算和评估进行了大量研究，但目前主要侧重于海藻可移出碳汇，主要运用物质质量评估法直接估算海藻碳汇能力<sup>[17]</sup>。但是，藻体生物量和组织碳量并不能充分代表其光合生产力，一部分光合生产力会通过复杂的生物化学过程以 POC

表 2 海带养殖区颗粒和溶解有机物元素比的季节变化

Tab. 2 Seasons variation of molar ratios of POM and DOM in *S. japonica* mariculture zone

日期 date	颗粒碳氮比/ (mol : mol) POC : PON	颗粒氮磷比/ (mol : mol) PON : POP	颗粒碳磷比/ (mol : mol) POC : POP	溶解碳氮比/ (mol : mol) DOC : DON	溶解氮磷比/ (mol : mol) DON : DOP	溶解碳磷比/ (mol : mol) DOC : DOP
2019-01-12	6.51±0.82 <sup>ab</sup>	17.28±4.99 <sup>a</sup>	110.32±23.55 <sup>a</sup>	19.00±2.73 <sup>a</sup>	62.97±7.65 <sup>a</sup>	1 200.53±244.56 <sup>ab</sup>
2019-02-21	8.17±0.35 <sup>c</sup>	11.66±6.02 <sup>a</sup>	94.10±44.72 <sup>a</sup>	42.51±11.34 <sup>b</sup>	16.91±7.65 <sup>b</sup>	699.96±274.32 <sup>b</sup>
2019-03-12	5.75±0.24 <sup>a</sup>	16.47±3.07 <sup>a</sup>	94.40±15.13 <sup>a</sup>	57.75±29.43 <sup>b</sup>	14.33±4.45 <sup>b</sup>	742.67±174.94 <sup>b</sup>
2019-04-20	7.01±0.26 <sup>b</sup>	13.27±2.58 <sup>a</sup>	92.87±17.28 <sup>a</sup>	102.40±16.02 <sup>c</sup>	16.43±2.31 <sup>b</sup>	1 673.21±283.46 <sup>c</sup>
2019-05-26	8.95±0.26 <sup>c</sup>	51.30±15.41 <sup>b</sup>	456.65±126.45 <sup>b</sup>	11.41±4.85 <sup>a</sup>	51.65±1.91 <sup>c</sup>	585.63±231.80 <sup>b</sup>

和 DOC 的形式迁移进入水体或沉积物中<sup>[18]</sup>。据报道, 大型海藻在生长过程中释放的 DOC 可占沿海水域 DOC 总量的 20%<sup>[19]</sup>。海带养殖区溶解有机物主要是海带养殖过程中叶片表面释放的大量黏液, 导致海水中 DOC 含量升高。如桑沟湾海带能以 (64.81±40.86) μmol/(L·d) 的速率向海水中释放 DOC<sup>[20]</sup>。本研究发现 1—4 月南日岛海带养殖期海水中 DOC 含量较高, 但 5 月底海带收获后海水 DOC 大幅度降低, 进而大幅改变溶解有机物的元素比值, 说明海带养殖可能是海水 DOC 的主要来源之一。在海带养殖期间, 黄海爱莲湾海带养殖区 DOC 浓度高于外海非养殖区<sup>[21]</sup>, 这与本研究结论一致。通过细菌和病毒的代谢活动可以将新产生的 DOC 转化为惰性 DOC, 惰性 DOC 可在海水中长久储存, 此即“微型生物碳泵”(MCP)<sup>[22]</sup>。因此, 惰性 DOC 库可能是近海海藻养殖碳汇功能的重要组成部分, 但相关研究还很缺乏<sup>[23-24]</sup>。

大陆架海区水体一般较浅, 碳沉积现象在大陆架海区非常显著。近海沉积物中的有机碳是海洋碳库的重要组成部分之一, 海藻养殖是沉积物有机碳的重要来源之一<sup>[25]</sup>。有研究表明海带养殖生态系统中, 海水中的 POC 主要来源于碎屑和浮游植物<sup>[10]</sup>。海带是南日岛的主要养殖品种, 本研究所选取的采样地点位于海带集中养殖区, 1 km 以内没有其他养殖物种。本研究发现浮游植物占 POC 的量相对较小(表 1), 说明南日岛海带养殖区 POC 主要来源可能为海带养殖过程中所释放的碎屑, 尤其 5 月海带收割时造成藻体损伤而产生大量碎屑, 可能导致海水 POC 显著升高。

根据报道, 巨藻、海带等大型褐藻碎屑生产值平均为 706 g C/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[26]</sup>, 一部分碎屑可被微生物快速降解转化为 DOC, 还有一大部分碎屑

经过生物消耗、传递、沉降和分解等一系列生物学过程从海水表层向海底转移和储存, 此即“生物泵”(BP)<sup>[27]</sup>。生物泵所引起的碳沉积, 亦是近海养殖碳汇功能的重要组成部分之一, 部分沉积的碎屑在海底流等物理作用的驱动下可向大洋及深海输送<sup>[25]</sup>。最近的研究表明, 大型海藻释放的 POC 和 DOC 可以输出到大洋和深海, 最远可达 5 000 km, 最深达 4 km<sup>[25, 28]</sup>。以后的研究需要关注不同养殖大型海藻释放有机物的特点及对海水 POM 和 DOM 的影响, 以及环境因子对释放速率的影响。此外, 本研究还发现海带组织、养殖区表层海水颗粒有机物以及溶解有机物三者的 C : N : P 元素比值各不相同, 其内在机制和潜在生物地球化学效应有待研究。

近年来, 我国鼓励发展绿色低碳经济。而以养殖大型海藻为典型代表的海洋渔业被认为可能具有较大的碳汇潜力, 因此成为研究热点, 但相关研究还处于起步阶段。在海洋环境中, 有多种因素可以对海水 POM 和 DOM 产生影响, 比如外源污染, 包括陆源输入、养殖区附近其他养殖物种的释放和海底沉积物的分解等; 各种理化和生物环境因素可以通过改变海藻代谢来影响 POM 和 DOM 的释放; 而海水交换可以直接改变海水 POM 和 DOM 的浓度。在后续研究中, 还需要对这些因素加以全面深入地分析, 才能定量评估近海生态系统中水产养殖的生态环境功能。

综上, 南日岛养殖海带具有较高的生长速率和初级生产力, 可能是养殖区海水颗粒有机物和溶解有机物的重要来源。因此, 养殖海带的碳汇潜力可能被低估。

#### 参考文献 (References):

- [1] Harlin M M, Thorne-Miller B, Thursby G B.



- Ammonium uptake by *Gracilaria* sp. (Florideophyceae) and *Ulva lactuca* (Chlorophyceae) in closed system fish culture[M]//Jensen A, Stein J R. Proceedings of the ninth international seaweed symposium. Princeton, NJ: Science Press, 1978.
- [ 2 ] Buschmann A H, Troell M, Kautsky N, *et al.* Integrated tank cultivation of salmonids and *Gracilaria chilensis* (Gracilariales, Rhodophyta)[J]. *Hydrobiologia*, 1996, 326-327(1): 75-82.
- [ 3 ] Neori A, Msuya F E, Shauli L, *et al.* A novel three-stage seaweed (*Ulva lactuca*) biofilter design for integrated mariculture[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2003, 15(6): 543-553.
- [ 4 ] 毛玉泽, 杨红生, 王如才. 大型藻类在综合海水养殖系统中的生物修复作用[J]. *中国水产科学*, 2005, 12(2): 225-231.
- Mao Y Z, Yang H S, Wang R C. Bioremediation capability of large-sized seaweed in integrated mariculture ecosystem: a review[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(2): 225-231(in Chinese).
- [ 5 ] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2018 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- Fishery Bureau of Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China. National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical book 2018[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019(in Chinese).
- [ 6 ] 黄健. 福建南日岛东岱村北部海域夏秋冬海水水质营养状况分析评价[J]. *福建水产*, 2014, 36(2): 119-124.
- Huang J. Survey and assessment of seawater quality and nutritional status at North sea area of Dong Dai village in Nan Ri island in summer, winter and spring[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2014, 36(2): 119-124(in Chinese).
- [ 7 ] Solórzano L, Sharp J H. Determination of total dissolved phosphorus and particulate phosphorus in natural waters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1980, 25(4): 754-758.
- [ 8 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763-2007 海洋调查规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 12763-2007 Specifications for oceanographic survey[S]. Beijing: China Standards Press, 2008(in Chinese).
- [ 9 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378-2007 海洋监测规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB 17378-2007 The Specification for marine monitoring[S]. Beijing: China Standards Press, 2008(in Chinese).
- [10] Xu Q, Gao F, Yang H S. Importance of kelp-derived organic carbon to the scallop *Chlamys farreri* in an integrated multi-trophic aquaculture system[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2016, 34(2): 322-329.
- [11] Horne R A. Marine chemistry[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969: 77-198.
- [12] 毛玉泽, 李加琦, 薛素燕, 等. 海带养殖在桑沟湾多营养层次综合养殖系统中的生态功能[J]. *生态学报*, 2018, 38(9): 3230-3237.
- Mao Y Z, Li J Q, Xue S Y, *et al.* Ecological functions of the kelp *Saccharina japonica* in integrated multi-trophic aquaculture, Sanggou Bay, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3230-3237(in Chinese).
- [13] Zhang J H, Fang J G, Wang W, *et al.* Growth and loss of mariculture kelp *Saccharina japonica* in Sungo Bay, China[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2012, 24(5): 1209-1216.
- [14] Ritschard R L. Marine algae as a CO<sub>2</sub> sink[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, 64(1-2): 289-303.
- [15] Luysaert S, Schulze E D, Börner A, *et al.* Old-growth forests as global carbon sinks[J]. *Nature*, 2008, 455(7210): 213-215.
- [16] 周毅, 杨红生, 刘石林, 等. 烟台四十里湾浅海养殖生物及附着生物的化学组成、有机净生产量及其生态效应[J]. *水产学报*, 2002, 26(1): 21-27.
- Zhou Y, Yang H S, Liu S L, *et al.* Chemical composition and net organic production of cultivated and fouling organisms in Sishili Bay and their ecological effects[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2002, 26(1): 21-27(in Chinese).
- [17] 唐启升, 刘慧. 海洋渔业碳汇及其扩增战略[J]. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 68-73.
- Tang Q S, Liu H. Strategy for carbon sink and its amplification [J]. *China Society of Fisheries* sponsored by China Society of Fisheries

- fication in marine fisheries[J]. *Engineering Science*, 2016, 18(3): 68-73(in Chinese).
- [18] Tyler A C, McGlathery K J. Uptake and release of nitrogen by the macroalgae *Gracilaria vermiculophylla* (Rhodophyta)[J]. *Journal of Phycology*, 2006, 42(3): 515-525.
- [19] Wada S, Hama T. The contribution of macroalgae to the coastal dissolved organic matter pool[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 129: 77-85.
- [20] Mahmood T, Fang J G, Jiang Z J, *et al.* Seasonal distribution, sources and sink of dissolved organic carbon in integrated aquaculture system in coastal waters[J]. *Aquaculture International*, 2017, 25(1): 71-85.
- [21] Li H M, Zhang Y Y, Liang Y T, *et al.* Impacts of maricultural activities on characteristics of dissolved organic carbon and nutrients in a typical raft-culture area of the Yellow Sea, North China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 137: 456-464.
- [22] 焦念志. 海洋固碳与储碳——并论微型生物在其中的重要作用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(10): 1473-1486.
- Jiao N Z. Carbon fixation and sequestration in the ocean, with special reference to the microbial carbon pump[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2012, 42(10): 1473-1486(in Chinese).
- [23] Jiao N Z, Herndl G J, Hansell D A, *et al.* Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: long-term carbon storage in the global ocean[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, 8(8): 593-599.
- [24] 张永雨, 张继红, 梁彦韬, 等. 中国近海养殖环境碳汇形成过程与机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 60(12): 2097-2107.
- Zhang Y Y, Zhang J H, Liang Y T, *et al.* Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(12): 2097-2107.
- [25] Krause-Jensen D, Duarte C M. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(10): 737-742.
- [26] Krumhansl K A, Scheibling R E. Production and fate of kelp detritus[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 467: 281-302.
- [27] Longhurst A R, Glen Harrison W. The biological pump: profiles of plankton production and consumption in the upper ocean[J]. *Progress in Oceanography*, 1989, 22(1): 47-123.
- [28] Ortega A, Gernaldi N R, Alam I, *et al.* Important contribution of macroalgae to oceanic carbon sequestration[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(9): 748-754.

## Growth and contents of C, N, and P of kelp (*Saccharina japonica*) cultured in Nanri Island, China and its effects on particulate and dissolved organic matter of seawater

CHEN Siwang, XU Kai, WANG Wenlei, XU Yan,  
CHEN Changsheng, XIE Chaotian, JI Dehua\*  
(College of Fisheries, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to study the ecological and environmental effects of kelp aquaculture, this study investigated the growth rate, the tissue elemental contents (C, N, and P) and ratios of cultured commercial kelp (*Saccharina japonica*), in Nanri Island, Fujian Province, and the seasonal variations of the particulate and dissolved organic matter in the cultured area. The result showed that the wet weight of kelp varied as a power function of the length ( $W=0.02L^{7.57}$ ,  $R^2=0.84$ ). Besides, the wet weight ( $W=5.45t-30.50$ ,  $R^2=0.96$ ), the length ( $L=1.72t+41.18$ ,  $R^2=0.97$ ), and the width ( $W=0.30t+5.28$ ,  $R^2=0.93$ ) were linearly increased with the culture days. The tissue C/N ratio varied from 9.13 to 18.66, N/P ratio ranged from 11.32 to 18.48, and C/P ratio varied from 153.18 to 267.99. The tissue C/N ratio varied as an exponential function of N content ( $Y=748.30e^{-4.10x}$ ,  $R^2=0.88$ ), and the C/P ratio varied as an exponential function of tissue P content ( $Y=50.21e^{-0.60x}$ ,  $R^2=0.92$ ). The seawater POC, PON, and POP in the culture zone varied from 0.33 to 0.86 mg/L, from 0.07 to 0.11 mg/L, and from 0.01 to 0.02 mg/L, respectively. The DOC, DON, and DOP in seawater of culture zone varied from 1.98 to 17.06 mg/L, from 0.20 to 0.55 mg/L, and from 0.01 to 0.04 mg/L, respectively. The average C, N, and P contents at harvest period were 26.17%, 1.76%, and 0.29%, respectively. The total production of cultured kelp in Fujian Province was about 768 300 tons, which indicates that the removable C, N, and P contents were about 201 300, 13 500, and 2 200 t, respectively. Our result demonstrated that the kelp aquaculture is an important source of seawater organic matter in the culture area, and is one of the important components of coastal carbon cycle.

**Key words:** *Saccharina japonica*; growth; C : N : P; particulate organic matter; dissolved organic matter; ecological and environmental function; Nanri Island

**Corresponding author:** JI Dehua. E-mail: dhji@jmu.edu.cn

**Funding projects:** Fujian Province Seed Industry Planning Project Sub-project (2017FJSCZY01); China Agriculture Research System (CARS-50); National Key Research and Development Program of China (2018YFD0900702)