

邵魁双, 巩宁, 王立军, 等. 大连温带海域潮间带底栖海藻固碳和储碳潜力模拟研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(12): 113–120, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.12.011

Shao Kuishuang, Gong Ning, Wang Lijun, et al. Simulation study on the carbon fixed and stored by intertidal seaweeds in temperate waters in Dalian[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(12): 113–120, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.12.011

# 大连温带海域潮间带底栖海藻固碳 和储碳潜力模拟研究

邵魁双<sup>1</sup>, 巩宁<sup>2</sup>, 王立军<sup>1</sup>, 曲翊<sup>3</sup>, 杜念东<sup>4</sup>

(1. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2. 大连海事大学 环境系统生物学研究所, 辽宁 大连 116026; 3. 大连市环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 4. 大连海洋大学 水产学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 底栖海藻是海洋生态系统中重要的初级生产力, 开展其固碳和储碳机制研究, 有利于提高对我国海域海洋固碳和储碳潜力的认识。本文基于海区条件的模拟, 开展了大连海域潮间带优势海藻的日固碳量、日呼吸量和日有机碳释放量的测定, 结合海区生物量的调查, 阐述了 3 个海藻床潮间带海藻固碳和储碳的季节变化规律。结果显示: 在海藻固碳能力方面, 绿藻类的固碳能力最强, 褐藻类次之, 红藻类最低。大连海域潮间带海藻的固碳量、储碳量和有机碳释放量在 12 月至 5 月处于较高水平, 6 月至 11 月较低, 平均每个海藻床潮间带区域年固碳量和年有机碳释放量分别为  $1.72 \times 10^5$  g/a 和  $2.1 \times 10^4$  g/a。潮间带海藻月固碳量是储碳量的 1.7 倍。

**关键词:** 底栖海藻; 固碳; 储碳

中图分类号: X55 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2019)12-0113-08

## 1 引言

工业革命以来, 人类经济活动的高速发展, 促进了温室气体(以  $\text{CO}_2$  为主)浓度的显著升高, 引发了地球表面冰雪覆盖面积减小、海平面上升等一系列全球性变化<sup>[1-3]</sup>。发展低碳经济, 减少温室气体的排放已经逐步为国际社会认同。为了最大限度降低减排义务, 维护本国利益, 各国政府都在寻求各自的  $\text{CO}_2$  减排与增汇对策技术<sup>[4]</sup>。

减少温室气体排放, 除改变现有能源消费结构、减少对化石燃料的依赖外, 利用生物固碳是目前比较经济可靠的一条途径。生物固碳, 又称生物碳汇, 即通过植物的光合作用, 将大气中的  $\text{CO}_2$  转化为有机碳储存在生物体内, 并通过食物链传递在生态系统内部流转。目前生物碳汇主要包括森林碳汇和海洋碳汇

(又称蓝碳)<sup>[5]</sup>。海洋是地球表面最大的碳库, 其在调节全球气候方面, 特别是在减缓  $\text{CO}_2$  等温室气体效应方面作用巨大, 据估算, 海洋每年大约可吸收人类排放  $\text{CO}_2$  的 1/3, 近  $22 \times 10^8$  t 碳<sup>[6-8]</sup>, 其中, 海洋生物捕获了地球上约 55% 的生物碳或绿色碳, 海洋碳汇已成为缓解气候变暖的重要途径<sup>[5]</sup>。

我国分布有 1.86 万千米的大陆岸线和众多岛屿, 基岩海岸占主岸线的 15.2%<sup>[9]</sup>, 分布着大量以底栖海藻群落为主导结构的海藻床生态系统。底栖海藻是浅海生态系统中重要的植物类群和初级生产者, 具有很高的初级生产力, 在不到海洋总面积 1% 的沿岸带构成海洋总初级生产力的 10%<sup>[10]</sup>。

中国是海藻养殖大国, 因此, 有关养殖海藻固碳估算方法和固碳量的研究得到国内学者的高度重视<sup>[11-17]</sup>。尽管计算方法不同, 但这些研究大都基于海藻体内碳

收稿日期: 2019-02-16; 修订日期: 2019-10-28。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1402104); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13020401); 海洋公益性专项(201105021)。

作者简介: 邵魁双(1973—), 男, 辽宁省凤城市人, 副研究员, 博士, 主要从事海藻生物学研究。E-mail: ksshao@nmemc.org.cn

含量的统计,而未考虑到海藻在日常代谢中固定的总碳量,以及排出的碳量,因此,基于现存量的估算方法不能客观反映海藻的固碳强度,而只是对海藻体内储碳的评估,有关海藻的固碳潜力亟需重新认识。尽管有些学者认为藻类碳汇强度除了现存量外,还应包括溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC,含生物碎屑)向水体和沉积物的输送部分,但却没有实测数据,基本上是沿用经验数据<sup>[6]</sup>。

与热带海域相比,温带海域分布的底栖海藻通常个体大、世代周期长,呈优势分布,尤其是在潮下带区域,优势分布的海带、裙带菜等大型褐藻藻体长度可达 2~10 m(最长可达到 100 m 以上),常常构成茂密的海底森林,因此,温带海域的海藻固碳潜力巨大。潮下带区域海藻分布范围广,是固碳的主力军,但开展研究需要专门的潜水和测量设备,操作难度大;潮间带是陆地和海洋的过渡区域,是人类最容易接近的海洋栖息地,可以在低潮期间通过调查掌握海藻的生存分布,结合海藻自身固碳特性的分析,获得固碳的相关数据。因此,本文期望通过对大连海域潮间带自然分布海藻的年固碳强度和储碳规律的研究,建立底栖海藻固碳和储碳研究的新方法和新思路,以期客观评估我国温带海域海藻的固碳潜力提供依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 潮间带优势海藻的固碳速率测定

#### 2.1.1 试验材料的选取

选取了大连海域各季节优势分布的潮间带海藻,分别为绿藻门中的孔石莼(*Ulva pertusa*)、缘管浒苔(*Ulva linza*)、盘苔(*Blidingia minima*)、袋礁膜(*Monostroma angicava*),褐藻门中的萱藻(*Scytosiphon lomentarius*)、鼠尾藻(*Sargassum thunbergii*),红藻门中的马泽藻(*Mazzaella japonica*)、楔基角叉菜(*Chondrus nipponicus*)、单条胶粘藻(*Dumontia simplex*)、鸭毛藻(*Symphocladia latiuscula*)、松节藻(*Rhodomela confervoides*)。材料低温运回实验室后,用清洁海水和毛笔刷洗,去除藻体表面的浮泥和动物,然后用清洁海水培养,弱光保存 2 天,水温同现场。

#### 2.1.2 各供试海藻固碳速率的测定和计算

固碳速率测定:称取各供试藻体(0.5±0.1)g,用清洁海水反复冲洗数次后,放入装有 PES 培养液的 60 mL 自制密闭反应瓶(见光部位采用石英玻璃,以增加透光度)中,培养液的初始 pH 值统一调整为(8.15±0.05),同时以磁力搅拌器搅拌(300 r/min),采用 Sartorius PP-15(精度 0.001)监测密闭系统 pH 值变化,反应过程中

温度同采集水温,变化控制在±0.5℃内,光源为白色高亮 LED 光源,各组光强如下所述,反应时间为 20 min。通过自编的总无机碳(DIC)计算软件计算水体里 DIC 的变化速率。每组实验设 3 次重复。

固碳速率计算:  $v_i = \Delta \text{DIC} / (w \cdot t)$ , 式中:  $v_i$  为固碳速率(单位:  $\text{g} / (\text{g} \cdot \text{h})$ ),  $\Delta \text{DIC}$  为反应前后溶解无机碳差值,  $w$  为藻体重量(湿重),  $t$  为反应时间。

日固碳量的计算:大连海域潮汐属于典型的半日潮,即每天 2 次涨潮,2 次退潮,每次涨落潮间隔 6 h,在大潮退潮期间用自容式水下光量子计(型号 ALW-CMP,日本)采集水下光强数据,获得供试海藻所处潮位的光照幅度范围,确定每种海藻测试的光照强度及每个周期内的持续时间,其中,孔石莼、缘管浒苔的光强分别为:18.4  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、92  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、184  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、276  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、368  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,持续时间各为 1.2 h;袋礁膜的光强分别为:18.4  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、92  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、184  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、276  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,持续时间各为 1.5 h;盘苔的光强分别为:18.4  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、92  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、184  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、276  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、368  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、460  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,持续时间为 1 h;萱藻、鼠尾藻、马泽藻、松节藻、楔基角叉菜、单条胶粘藻、鸭毛藻的光强分别为:18.4  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、92  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、184  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,持续时间各为 2 h(表 1)。

日固碳量的计算:  $C_d = 2 \sum v_i \times t$ , 式中,  $C_d$  为日固碳量[单位:  $\text{g} / (\text{g} \cdot \text{d})$ ],  $v_i$  为各测试光强  $i$  下的固碳速率,  $t$  为在光强下持续的时间。

呼吸导致  $\text{CO}_2$  释放速率( $v_r$ )的测定:除光照强度为 0  $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^1)$ ,反应时间为 3~5 h 外,其他条件同上。

日呼吸量的计算:  $C_r = v_r \times t$ , 式中,  $C_r$  为日呼吸量[单位:  $\text{g} / (\text{g} \cdot \text{d})$ ],  $v_r$  为呼吸速率,  $t$  为呼吸时间, 12 h。

日净固碳量的计算:  $C_{\text{net}} = C_d - C_r$ , 式中,  $C_{\text{net}}$  为日净固碳量,  $C_d$  为日固碳量,  $C_r$  为日呼吸量。

单位藻体月净固碳量的计算:  $C_m = C_{\text{net}} \times t$ , 式中,  $C_m$  为月固碳量 [ $\text{g} / (\text{g} \cdot \text{m})$ ],  $C_{\text{net}}$  为日净固碳量,  $t$  为该藻在海区存在的时间,简化为 30 d/月,个别种的固碳时间不满足整月要求的,则以实际调查为准。

### 2.2 供试海藻溶解有机碳和颗粒有机碳释放速率的测定

实验容器为 250 mL 密闭三角烧瓶,称取藻(0.5±0.1)g,实验材料在光照培养箱中培养 24 h,光周期为 12:12,实验水温与采集水温相同。在光周期中,光照强度梯度设置同上,6 h 为 1 个周期,一共 2 个周期。实验前后,分别量取各组试验容器中的海水培养

表 1 各供试海藻的反应条件  
Tab. 1 Reaction conditions of the tested seaweeds

试验种类	光照梯度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	反应时间/h	
绿藻	孔石莼	18.4, 92, 184, 276, 368	$8\pm 0.5, 15\pm 0.5, 19\pm 0.5$	1.2
	缘管浒苔	18.4, 92, 184, 276, 368	$6\pm 0.5, 8\pm 0.5$	1.2
	袋礁膜	18.4, 92, 184, 276	$3\pm 0.5, 8\pm 0.5$	1.5
	盘苔	18.4, 92, 184, 276, 368, 460	$3\pm 0.5, 8\pm 0.5$	1.0
褐藻	萱藻	18.4, 92, 184	$3\pm 0.5, 8\pm 0.5$	2.0
	鼠尾藻	18.4, 92, 184	$8\pm 0.5, 15\pm 0.5$	2.0
红藻	马泽藻	18.4, 92, 184	$3\pm 0.5, 9\pm 0.5, 15\pm 0.5$	2.0
	松节藻	18.4, 92, 184	$8\pm 0.5, 15\pm 0.5, 22\pm 0.5$	2.0
	楔基角叉菜	18.4, 92, 184	$3\pm 0.5, 8\pm 0.5$	2.0
	单条胶粘藻	18.4, 92, 184	$3\pm 0.5, 6\pm 0.5$	2.0
	鸭毛藻	18.4, 92, 184	$15\pm 0.5, 22\pm 0.5$	2.0

液,测定海水中的 DOC 和 POC。根据实验前后 DOC 和 POC 的差值,计算单位重量藻体 DOC 和 POC 的日释放速率,每组实验设 3 次重复。

培养液中总有机碳(TOC)的测定按照海洋监测规范(GB 17378.4-2007)第 4 部分总有机碳仪器法进行测定。DOC 含量:量取一定量培养液,用 Whatman GF/C 玻璃纤维滤膜过滤至采样瓶中,然后按照总有机碳方法测试分析。POC 含量:根据公式  $POC=TOC-DOC$ ,先测出海水中的 TOC 和 DOC 含量后,二者之差即为 POC 含量。

单位藻体 TOC 月释放量的计算:  $TOC_m = TOC_d \times t$ , 式中:  $TOC_m$  为月释放量 [ $\text{g}/(\text{g}\cdot\text{m})$ ],  $TOC_d$  为 TOC 日释放量,  $t$  为该藻在海区存在的时间,简化为 30 d/月,个别种的固碳时间不满足整月要求的,则以实际调查为准。

### 2.3 各优势海藻含碳率

各优势海藻含碳量分析:将野外采集的藻体去除表面附着物,吸干表面水分后,称量获取湿重;然后在恒温烘干箱中经  $55^{\circ}\text{C}$  24 h 烘干至恒重以后,计算干湿比。取少量烘干藻体用研钵研碎,称取 0.1 g 左右粉末样品经元素分析仪(Elemetar Analysesysteme GmbH Hanau, 德国)测定后,算出每种海藻含碳率。

### 2.4 大连海域潮间带优势海藻的生物量

优势海藻生物量的测量:选取大连旅顺子弹库海域、黑石礁海域(附近有城市排污口)、付家庄海域海藻床的潮间带为调查地点(图 1),每月开展潮间带优势海藻的空间分布面积和单位生物量调查,以获取不同季节各海藻床潮间带优势海藻的总生物量。

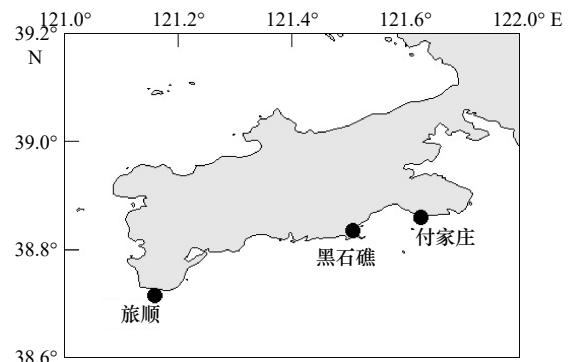


图 1 调查海域和采样点

Fig. 1 The study area and location of sampling

其中,优势海藻分布面积的调查:在各海藻床,用博世激光测距仪对各优势种集中分布的岩礁进行测量,并利用机器本身自带的面积计算功能计算各优势种分布面积。

不同月份优势种单位面积生物量调查:在各海藻床优势种集中的区域设置样方,每个优势种集中区域测量 5 个样方,取平均值,样方面积为  $(25\times 25)\text{cm}^2$ ,将样方内的海藻收集起来,低温运回实验室后,去除泥沙和藻体表面附着物,经上述条件恒温烘干后,测量藻体干重,根据干湿比,算出藻体湿重。

不同月份各海藻床优势海藻总生物量=各优势种单位面积生物量 $\times$ 各优势种分布总面积。

### 2.5 各海藻床潮间带海藻不同月份净固碳量、储碳量的估算

#### 2.5.1 各海藻床潮间带底栖海藻净固碳量估算

优势海藻月净固碳量=各优势种的月净固碳量

(单位湿重藻体)×月生物量(湿重)。

各海藻床海藻月净固碳量=各优势海藻净固碳量总和。

### 2.5.2 各海藻床潮间带海藻储碳量(现存量)的估算

优势海藻月储碳量=各优势种的含碳率×海区生物量(干重)。

各海藻床海藻体内储碳量=各优势海藻体内储碳量总和。

### 2.5.3 各海藻床潮间带海藻有机碳释放量估算

优势海藻有机碳月释放量=各优势种月释放量(单位湿重藻体)×月生物量(湿重)。

各海藻床海藻有机碳月释放量=各优势海藻有机碳月释放量总和。

## 2.6 数据统计与处理

数据统计和图表制作使用 Excel2013 软件。

每组数据用平均值±标准差或平均值表示。

## 3 结果

### 3.1 各优势海藻日固碳量、有机碳日释放量和含碳率

在测试的 3 类海藻中,绿藻的固碳能力最强,日净固碳量在  $(2.52 \pm 0.53) \sim (7.07 \pm 1.71)$  mg/(d·g),其中缘管浒苔的固碳能力最强,其次为袋礁膜;褐藻的固碳能力处于中等水平,日固碳量在  $(1.68 \pm 0.28) \sim (2.51 \pm 0.46)$  mg/(d·g);红藻的固碳能力普遍较低,日固碳量在  $(0.24 \pm 0.06) \sim (1.08 \pm 0.11)$  mg/(d·g)(表 2)。

各海藻溶解有机碳的日释放量普遍远高于颗粒有机碳的日释放量,在绿藻中,DOC 的日释放量约为

POC 日释放量的 3~5 倍;在红藻中,DOC 的日释放量约为 POC 日释放量的 1~9 倍。绿藻的 DOC 日释放量约为红藻的 3~50 倍,褐藻的 1.5~13 倍;绿藻的 POC 日释放量约为红藻的 2~21 倍,略高于褐藻。综合来看,绿藻的总有机碳日释放量最高,其次为褐藻,红藻则最低(表 2)。

在 3 类海藻中,褐藻的含碳率最高,平均为 35.28%,变化范围在 33.49%~37.06%;绿藻的平均含碳率为 27.52%,变化范围在 22.75%~30.68%;红藻的平均含碳率为 26.87%,变化范围在 22.39%~32.06%(表 2)。

### 3.2 调查海域潮间带海藻固碳量的月际变化

在大连海域,12 月至翌年 5 月是 1 年中潮间带底栖海藻固碳量较高的时期,月固碳量(3 个海藻床合计,下同)为  $3.99 \times 10^4 \sim 10.25 \times 10^4$  g,平均为  $7.15 \times 10^4$  g,其中固碳量最高的月份为 4 月份,达到  $10.25 \times 10^4$  g,其次为 12 月份和 5 月份,月固碳量分别为  $8.71 \times 10^4$  g 和  $7.56 \times 10^4$  g(图 2)。在这段时期内,对固碳量贡献最大的为绿藻缘管浒苔,其生物量变化对潮间带底栖海藻固碳总量产生显著影响。9~11 月次之,月固碳量仅为  $1.32 \times 10^4 \sim 1.85 \times 10^4$  g,平均为  $1.64 \times 10^4$  g。6~8 月是 1 年中固碳量最低的时期,月固碳量仅为  $0.86 \times 10^4 \sim 1.99 \times 10^4$  g,平均为  $1.24 \times 10^4$  g(图 2)。

3 个海藻床潮间带海藻合计的年固碳量为  $5.16 \times 10^5$  g/a,平均每个海藻床的年固碳量为  $1.72 \times 10^5$  g/a。其中绿藻对固碳的贡献最大,为  $3.42 \times 10^5$  g/a,其次为红藻,为  $1.55 \times 10^5$  g/a,褐藻的贡献最小,仅  $0.19 \times 10^5$  g/a(图 2)。

表 2 各供试海藻日固碳量、有机碳日释放量和含碳率

Tab. 2 Daily carbon fixation, release of organic carbon and carbon content rate of tested seaweeds

供试海藻	日净固碳量/mg·d <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup>	DOC 日释放量/mg·d <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup>	POC 日释放量/mg·d <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup>	含碳率/%	
绿藻	孔石莼	3.41±0.29	0.689±0.043	0.144±0.118	30.68±0.42
	缘管浒苔	7.07±1.71	0.670±0.048	0.226±0.067	27.31±0.41
	袋礁膜	6.36±1.38	1.502±0.074	0.302±0.151	29.33±0.45
	盘苔	2.52±0.53	0.372±0.022	0.098±0.012	22.75±0.37
褐藻	鼠尾藻	2.51±0.46	0.238±0.046	0.134±0.029	33.49±1.09
	萱藻	1.68±0.28	0.110±0.010	0.077±0.007	37.06±0.75
红藻	马泽藻	1.08±0.11	0.103±0.017	0.014±0.007	25.77±0.3
	楔基角叉菜	0.48±0.03	0.067±0.014	0.034±0.002	28.65±0.41
	松节藻	0.72±0.10	0.060±0.002	0.046±0.004	25.46±0.49
	单条胶粘藻	0.72±0.12	0.060±0.010	0.014±0.005	32.06±0.26
	鸭毛藻	0.24±0.06	0.029±0.005	0.019±0.002	22.39±0.56

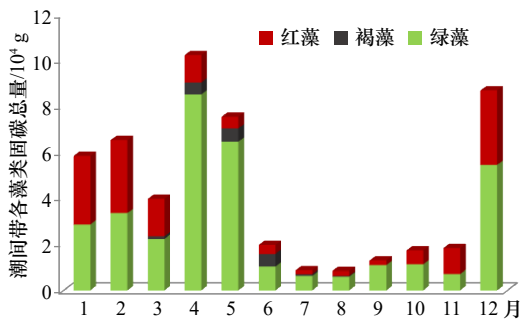


图2 调查海域潮间带底栖海藻固碳量的月际变化

Fig. 2 Monthly variation of the amount of the carbon fixed by intertidal seaweeds

### 3.3 调查海域潮间带底栖海藻储碳量的月际变化

在大连海域, 冬季(12月至翌年2月)是潮间带底栖海藻储碳量最高的季节, 月储碳量(3个海藻床合计, 下同)在  $4.67 \times 10^4 \sim 5.32 \times 10^4$  g, 平均为  $5.09 \times 10^4$  g, 其中, 红藻马泽藻的贡献最大, 其次为绿藻的缘管浒苔(图3)。与冬季相比, 在3-5月期间, 潮间带底栖海藻储碳量显著下降, 月储碳量降为  $2.48 \times 10^4 \sim 3.33 \times 10^4$  g, 平均为  $3.16 \times 10^4$  g, 但仍远高于夏季和秋季(图3)。在此期间, 随着马泽藻生物量的逐渐减小, 红藻储碳比例明显降低, 绿藻储碳占据优势地位。随着鼠尾藻生物量的增加, 褐藻储碳比例也有所增加(图3)。

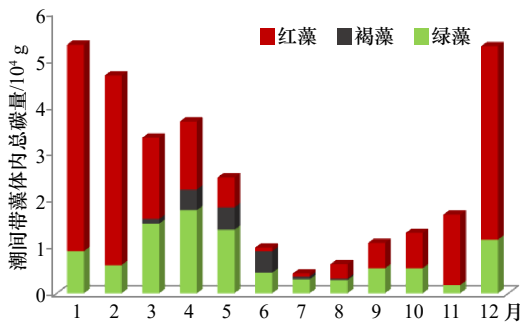


图3 调查海域潮间带海藻体内储碳量的月际变化

Fig. 3 Monthly variation of the amount of the carbon stored in intertidal seaweeds

6-8月是1年中潮间带底栖海藻储碳量最低的时期, 月储碳量仅为  $0.62 \times 10^4 \sim 0.98 \times 10^4$  g, 平均为  $0.68 \times 10^4$  g。随着5月份红藻储碳比例持续降低, 褐藻储碳比例显著上升, 在6月份达到最高, 随后急剧降低, 这段时间, 绿藻储碳比例相对稳定(图3)。

进入9月至11月, 潮间带底栖海藻的储碳量逐渐增加, 月储碳量升至  $1.08 \times 10^4 \sim 1.69 \times 10^4$  g, 平均为  $1.35 \times 10^4$  g, 随着马泽藻生物量增加, 红藻储碳比例也开始逐渐增加(图3)。

### 3.4 调查海域底栖海藻的有机碳释放情况

调查海区底栖海藻有机碳月释放量变化趋势与海藻固碳量变化趋势一致, 也表现为12至翌年5月份释放量较高, 有机碳月释放量(3个海藻床合计, 下同)为  $0.65 \times 10^4 \sim 1.27 \times 10^4$  g, 平均为  $0.87 \times 10^4$  g, 4月份释放量最高, 达到  $1.27 \times 10^4$  g, 在这段时期内, 对有机碳释放贡献最大的为绿藻缘管浒苔。6-11月, 由于海藻(尤其是绿藻)生物量较低, 有机碳月释放量也较低, 仅为  $0.11 \times 10^4 \sim 0.26 \times 10^4$  g, 平均为  $0.18 \times 10^4$  g(图4)。绿藻释放的DOC占TOC的比重较大, 平均为80.3%, 红藻次之, 为76.5%, 褐藻最低, 为61.8%。

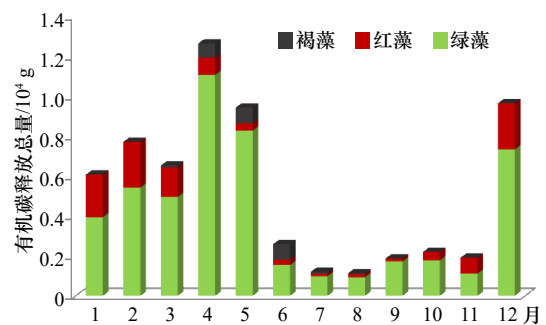


图4 调查海域潮间带底栖海藻有机碳释放的月际变化

Fig. 4 Monthly variation of the amount of released organic carbon by intertidal seaweeds

3个调查区域海藻合计的有机碳年释放量为  $6.30 \times 10^4$  g/a, 平均每个区域的年有机碳释放量为  $2.1 \times 10^4$  g/a。

## 4 讨论

### 4.1 关于海藻固碳和储碳的理解

关于藻类的固碳强度, 目前普遍基于现存量的估算, 这实际上是对藻类固碳和储碳的一种混淆和误解。藻类固碳是细胞通过光合作用, 将溶于水中的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{HCO}_3^-$  吸收, 转化为有机物的过程。与人类摄食一样, 藻类固碳是每天都在进行的, 是一个累积过程。被藻类固定的碳通常会表现出4种转化途径, 即呼吸释放、构成藻体结构(现存量)、以有机碳形式释放以及进入食物链。因此在1个生存周期内, 海藻的固碳总量=海藻的现存量+生活周期内排放的TOC+呼吸排泄碳量+食藻动物摄食量, 其中, 除呼吸排碳外, 其他均属于储碳过程。因此, 仅仅统计现存量, 实际上是大大低估了海藻的固碳潜力, 由本文结果推算, 海藻的月固碳量是月现存量的1.1~3倍, 平均为1.7倍, 因此, 仅统计后者至少忽略了海藻70%的固碳量。

与陆地多年生植物不同,海藻现存量储碳的意义,也需要重新认识。温带海域由于四季分明,因此,潮间带海藻群落存在明显的世代交替和季节演替。对于孔石莼、缘管浒苔等同型世代交替且生活史周期较短的海藻,其种群 1 年能出现两次,高峰期持续的时间为 1~2 个月;而对于萱藻、袋礁膜等异型世代交替的种类,其种群在 1 年内仅出现 1 次,每次持续的时间为 3~4 个月,因此,从个体世代来看,碳在潮间带海藻体内的储存周期范围在 3~4 个月。从群落水平来看,1 年之中,碳在潮间带海藻群落储存的高峰期仅 6 个月(12 月至翌年 5 月),与陆地乔木植物(世代寿命通常在几十年甚至上百年)相比,这样短的储碳周期对于降低大气 CO<sub>2</sub> 浓度、减缓气候变化的价值是可以忽略的<sup>[18]</sup>。但是相对于工业排碳,计算海藻年度固碳量以抵消人为排碳支出,而用于碳汇交易是有意义的,因此,从碳汇意义上讲,海藻固碳的价值要远大于储碳的意义。

尽管海藻在日常新陈代谢中释放的有机碳量较小,但其在海洋长期储碳中可能具有很大的潜力。海洋中的 DOC,按照生物可利用性可分为 3 类: LDOC(容易被降解的活性,滞留时间只有几分钟到几天)、SLDOC(可被缓慢降解,滞留时间几个月到若干年)、RDOC(难以被生物降解的惰性、周转时间为 5 000 年)<sup>[18-19]</sup>。底栖海藻在生活过程中会形成一些多糖、多肽等次级代谢产物物质,主要以 DOC 的形式释放出体外,用于抵御微生物降解和动物摄食<sup>[20-23]</sup>,其在环境中的存在应该是相对稳定的,应该隶属于 SLDOC(或 RDOC)。这些 SLDOC 在某些微型生物类群的作用下,可能转化为 RDOC(即惰性 DOC),RDOC 在海区中可以稳定的存在数千年的时间,构成海洋长期碳库的一部分<sup>[18]</sup>。当然,这一方面还有待更深入的研究。

对于进入食物链中的碳,目前还缺少准确的评估手段。海藻在生存周期内,藻体内的碳会因藻钩虾、螺类等食藻动物摄食进入食物链,积累在贝壳或因食物链传递而进入更高营养级生物体内。对于生存末期的海藻,除极少一部分碳因繁殖细胞附着进入下一代循环外,绝大部分被原生动物和细菌分解形成 POC,而进入微食物环,进入微食物环的碳经过细菌分解,也可能形成 RDOC,而进入长期碳库中储存<sup>[18]</sup>。

#### 4.2 对文中检测分析方法的说明

海水中溶解无机碳(DIC)的测定方法,主要有同位素<sup>14</sup>C法、红外吸收法、pH 漂移法,前两者灵敏度和精度高,在密度较低的浮游植物和野外水样测试中应用较多,但缺点是测试仪器昂贵,无法在线监测。而

大型海藻由于个体较大、光合固碳速率高,引起水体中 DIC 高幅变动,因此,在其固碳研究中采用 pH 漂移法<sup>[24]</sup>,具有安全、简便、可在线监测的优点,本文中采用精度为千分之一的 pH 计,其灵敏度完全满足测试要求。

由于不同季节、不同天气状况下太阳辐射强度差异较大,潮汐规律的变化、水体浑浊度都会导致潮间带海藻接收的光照强度发生强烈变化,因此,在实验室内实时模拟海藻的光强变化是非常困难的,为了便于测量和计算,本文根据各季节、大潮、晴天期间不同潮位的实测结果,将 1 个退潮周期内海藻接收的光照强度简化为 3~6 个节点,按照 6 h(因为大连是典型的半日潮)确定每个节点的持续时间,并应用在固碳模拟试验中。

在计算自然海区海藻固碳量中,海藻固碳时间和生物量的确定存在一定的困难。为此,作者在野外调查中,除每月常规 2 次大潮调查外,在某些重点月份也会增加小潮调查,以获取供试藻类较为准确的生消时间。依据调查获得的种群密度和生物量数据,将潮间带优势种的生存周期分为早期、盛期和末期,在早期和末期(通常是在月末或月初),其种群的个体较小、数量较少,不足以构成优势种,因此,这段时期及海藻的生物量不计入固碳量计算内。在将早期和末期剔除以后,绝大部分测试海藻的盛期以完整月的形式持续 1~3 个月,因此,海藻的固碳量以月来计算。对于个别种的固碳时间不满足整月要求的,则以实际调查为准。在盛期范围内,优势海藻的分布密度和生物量相对稳定,通过两次大潮期间生物量的平均值统计,基本能反映海藻在该月内的持续生物量情况,因此,选择该生物量平均值作为供试海藻的月生物量用于海藻月固碳量的计算。

受制于生长基质(岩礁)、水深、营养盐等影响,底栖海藻群落的空间分布表现出较大的随机性,因此,本文以海藻床作为固碳和储碳统计的基础单元,而没有采取单位面积,既能兼顾海区海藻的客观分布,又能较为真实地反映海区整体固碳和储碳情况。本研究中 3 个海藻床的岸线长度接近(150~180 m),囊括了寡营养、富营养两种类型的海藻床,基本反映了大连海域各海藻床潮间带优势种的分布情况。需要指出的是,本文中计算的海藻床固碳量是基于 1 个自然年调查结果,由于气候变化的影响,底栖海藻的群落结构和物候期会发生一定的年际波动而导致海藻的固碳和储碳状况发生改变。

#### 4.3 影响潮间带底栖海藻固碳和储碳的因素

大连地处温带海域,温度是决定海藻区系分布和群落季节演替的最主要因素。受冬季严寒和夏季酷

暑影响, 潮间带海藻区系以亚寒带、冷温种和暖温种为主, 亚热带种为辅。冬季和春季, 亚寒带、冷温性和暖温性海藻占优, 种类丰富且生物量较高<sup>[25]</sup>, 因此, 这段时期是底栖海藻固碳和储碳的高峰期; 夏季, 仅有少量暖温性和亚热带种存在, 生物量较低, 是海藻固碳的低谷期。4-5月份是冷温性和暖温性海藻逐渐衰退的时期, 在此期间, 如果温度上升的慢, 海藻固碳和储碳的时间就会延长, 则海区固碳量也会增加。

在潮间带分布的海藻大多能适应营养盐丰富的环境, 营养盐浓度上升会促进这些藻类尤其是绿藻生物量的提高, 从而增加海藻的固碳量。浑浊度决定光线在海水中的传输距离, 显著影响着底栖海藻的垂直分布和固碳强度, 例如在透明度较低的海域如黑石礁区域, 底栖海藻分布的极限是水深6 m, 而透明度较高的付家庄海域, 底栖海藻的分布深度可以达到10 m。

#### 4.4 潮下带海藻固碳量的估算

本文的研究结果表明, 藻体结构简单、生活史周期较短的绿藻如缘管浒苔、袋礁膜、孔石莼等表现出来的特点是光合固碳速率高, 同时有机碳释放速率也高; 而藻体结构复杂、多年生的褐藻和红藻则表现出光合固碳速率和有机碳释放速率均相对较低的特点。

从自然分布来看, 由于对于光、温度和干露适应能力不同, 温带海域的底栖海藻垂直分布上表现出明

显的梯度特征, 在潮间带区域, 由于环境条件变化剧烈, 海藻个体普遍较小, 其中, 喜光、耐干露的绿藻(如缘管浒苔、袋礁膜)分布在中高潮带, 不耐干露的绿藻(如孔石莼)以及一些多年生的红藻(如马泽藻)和褐藻(如鼠尾藻)分布在中低潮带。从低潮线至10 m水深的潮下带区域, 分布的海藻主要为暖温性的多年生红藻(如马泽藻、石花菜)和大型褐藻(如海带、裙带菜、海黍子、鼠尾藻等), 间或分布着一些石莼目的绿藻。尽管固碳速率不如潮间带海藻, 但由于温度条件变化温和, 潮下带海藻的世代周期普遍较长、个体较大, 因此, 其固碳和储碳潜力应该远大于潮间带。以潮间带和潮下带都有分布的绿藻孔石莼为例, 潮下带个体的单位重量和生存期分别是潮间带个体的4倍以上和3倍以上(本文结果, 未列出), 尽管由于分布位置的光强差异, 前者单位重量藻体的日固碳量仅为后者的1/3.5(本文结果, 未列出), 但换算成单位面积分布海藻的固碳量, 潮下带孔石莼的固碳量应该为潮间带的4倍以上。此外, 潮下带分布有海带、裙带菜等大型褐藻, 其固碳能力与潮间带褐藻萱藻接近(本文结果, 未列出), 但单位面积海藻的现存量是潮间带的几十甚至几百倍, 生存周期大约为1~2倍, 且潮下带海藻分布面积至少为潮间带的几百倍, 因此, 每个海区潮下带单位面积的年固碳量应为潮间带的千倍以上。当然, 这一方面还有待更深入的研究。

#### 参考文献:

- [1] Zeebe R E, Gladrow W D. CO<sub>2</sub> in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes: Equilibrium, Kinetics, Isotopes[M]. Elsevier, 2001.
- [2] Caldeira K, Wickett M E. Oceanography: Anthropogenic carbon and ocean pH[J]. *Nature*, 2003, 425(6956): 365.
- [3] Brierley A S, Kingsford M J. Impacts of climate change on marine organisms and ecosystems[J]. *Current Biology*, 2009, 19(14): 602-614.
- [4] 王阳. 低碳经济发展的国际经验与中国的发展策略研究[J]. 南京财经大学学报, 2010(2): 11-14.  
Wang Yang. Low-carbon economy development in China[J]. *Journal of Nanjing University of Finance and Economics*, 2010(2): 11-14.
- [5] Nellemann C, Corcoran E, Duarte C M, et al. Blue carbon. A rapid response assessment[R]. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, 2009.
- [6] Sabine C L, Feely R A, Gruber N, et al. The Oceanic Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>[J]. *Science*, 2004, 305: 367-371.
- [7] Balino B M, Fasham M J R, Bowles M C. Ocean biogeochemistry and global change: JGOFS research highlights 1988-2000[J]. *IGBP Science*, 2001, 2: 1-32.
- [8] Battle M, Bender M L, Tans P P, et al. Global carbon sinks and their variability inferred from atmospheric O<sub>2</sub> and δ<sup>13</sup>C[J]. *Science*, 2000, 287: 2467-2470.
- [9] 赵玉灵. 近30年来我国海岸线遥感调查与演变分析[J]. *国土资源遥感*, 2010( S86): 174-177.  
Zhao Yuling. The remote sensing dynamic monitoring of China's shoreline evolution in the past 30 years[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2010( S86): 174-177.
- [10] Smith J V. Marine macrophytes as a global carbon sink[J]. *Science*, 1981, 211(4484): 838-840.
- [11] 纪建悦, 王萍萍. 我国海水养殖业碳汇能力测度及其影响因素分解研究[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(6): 871-878.  
Ji Jianyue, Wang Pingping. Research on China's mariculture carbon sink capacity and influencing factors[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(6): 871-878.
- [12] 周伟男. 硇洲岛岩礁带底栖生物群落结构及大型海藻的碳汇作用[D]. 广东: 湛江海洋大学, 2013: 10-52.  
Zhou Weinan. The macrobenthos community structure and effects on the carbon sink of macroalgae in the intertidal rocky zone in Naozhou Island[D]. Guangdong: Guangdong Ocean University, 2013: 10-52.
- [13] 严立文, 黄海军, 陈纪涛, 等. 我国近海藻类养殖的碳汇强度估算[J]. *海洋科学进展*, 2011, 29(4): 537-545.

- Yan Liwen, Huang Haijun, Chen Jitao, et al. Estimation of carbon sink capacity of algal mariculture in the coastal areas of China[J]. *Advances in Marine Science*, 2011, 29(4): 537–545.
- [14] 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 359–366.  
Zhang Jihong, Fang Jianguang, Tang Qisheng. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in China to the carbon cycle of coastal ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 359–366.
- [15] 岳冬冬. 海带养殖结构变动与海藻养殖碳汇量核算的情景分析[J]. *福建农业学报*, 2012, 27(4): 432–436.  
Yue Dongdong. Correlation between kelp aquaculture and carbon sinks[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 27(4): 432–436.
- [16] 权伟, 应苗苗, 康华靖, 等. 基于时间序列模型的洞头大型藻类碳汇强度预测分析[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(8): 63–67.  
Quan Wei, Ying Miaomiao, Kang Huajing, et al. Carbon sink capacity forecast of macroscopic algae in the coastal areas of Dongtou county based on time series model[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(8): 63–67.
- [17] 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 等. 中国近海生物固碳强度与潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 551–558.  
Song Jiming, Li Xuegang, Yuan Huamao, et al. Carbon fixed by phytoplankton and cultured algae in China coastal seas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 551–558.
- [18] 焦念志. 海洋固碳与储碳——并论微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 Nianzhi. Carbon fixation and sequestration in the ocean, with special reference to the microbial carbon pump[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 42(10): 1473–1486.
- [19] Ogawa H, Tanoue E. Dissolved organic matter in oceanic waters[J]. *Journal of Oceanography*, 2003, 59: 129–147.
- [20] Fogg G E, Boalch G T. Extracellular products in pure cultures of a brown Alga[J]. *Nature*, 1958, 181: 789–790.
- [21] Fogg G E. Release of glycollate from tropical marine plants[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1976, 3(1): 57–61.
- [22] Fogg G E. Extracellular products of algae[J]. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 1966, 4: 195–212.
- [23] Lefèvre M. Extracellular products of algae[M]. *Algae and Man*: Springer, 1964: 337–367.
- [24] 岳国峰, 王金霞, 朱明远, 等. 藻类无机碳营养的研究进展( I )——研究起源及研究方法[J]. *海洋科学*, 2003, 27(5): 15–17.  
Yue Guofeng, Wang Jinxia, Zhu Mingyuan, et al. Progress of inorganic carbon acquisition by algae ( I ): origin and methods of the studies[J]. *Marine Science*, 2003, 27(5): 15–17.
- [25] 邵魁双, 李熙宜. 大连海区潮间带底栖海藻群落的季节变化[J]. *大连水产学院学报*, 2000, 15(1): 29–34.  
Shao Kuishuang, Li Xiyi. Seasonal variation of intertidal benthic seaweed in Dalian[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2000, 15(1): 29–34.

## Simulation study on the carbon fixed and stored by intertidal seaweeds in temperate waters in Dalian

Shao Kuishuang<sup>1</sup>, Gong Ning<sup>2</sup>, Wang Lijun<sup>1</sup>, Qu Yi<sup>3</sup>, Du Niandong<sup>4</sup>

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2. Institute of Environmental Systems Biology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 3. Dalian Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 4. Institute of Aquaculture, Dalian Marine University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** To better understand the potential of carbon fixation in China Sea, it is necessary to conduct the researches on the mechanism of carbon fixed and stored by benthic seaweeds, the important primary productivities in marine ecosystems. In this paper, some dominant seaweeds from intertidal zones in Dalian were measured on the daily fixed and respired carbon, and daily release of organic carbon. Furthermore, seasonal variation of carbon fixed and stored by intertidal seaweeds from three seaweed beds in Dalian were elucidated, combined with the measurements of the biomass. The results showed that green algae had the strongest capacity in carbon fixation, followed by brown algae and red algae. The carbon fixed and stored, and organic carbon released by intertidal seaweeds in Dalian were higher in December-May, and lower in June-November. The annual total carbon fixed, and organic carbon released by intertidal seaweeds of each seaweed bed were  $1.72 \times 10^5$  g/a and  $2.1 \times 10^4$  g/a respectively. The amount of monthly fixed carbon was 1.7 times that of stored carbon.

**Key words:** benthic seaweeds; carbon fixation; carbon storage