

# 珊瑚藻类钙化的研究\*

高 坤 山

(汕头大学科学研究院能源与环境科学研究所 汕头 515063)

**提要** 于1991年4—6月,在日本海若峡湾采集珊瑚藻类样品,采用钙镁离子定量的方法,对小珊瑚藻、异边孢藻和大边孢藻的Ga、Mg及其碳酸盐的含量,无机和有机态碳元素的量比以及前两种藻类的钙化与光合作用固碳速度进行了研究。结果表明,三种珊瑚藻类的碳酸盐占藻体干重的77%—80%,其中CaCO<sub>3</sub>占66%—70%,MgCO<sub>3</sub>占10%—11%。小珊瑚藻中Ga的含量比两种边孢藻高,而Mg的含量则比后两者低。小珊瑚藻与异边孢藻的钙化速度在高光照强度[300μmol / (m<sup>2</sup> · s)]下比光合作用固碳速度慢;而在低光照强度[50μmol / (m<sup>2</sup> · s)]下钙化速度比光合作用速度快。钙化与光合作用都受光的影响,但钙化对光的敏感度相对较低。

**关键词** 海藻 珊瑚藻类 钙化 碳元素 光合作用

**学科分类号** Q946.91

藻类的钙化是钙质藻类将CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和Ca<sup>2+</sup>结合成CaCO<sub>3</sub>,使其构成藻体的一部分,也就是将一种形态的无机碳固定为另一种形态无机碳的过程。进行钙化的海藻主要是红藻中的珊瑚藻类,它们分布在邻近人类生活圈的近岸海域,在钙与碳循环过程中起着不可忽视的作用。珊瑚藻类的固碳过程包括光合作用和钙化,这两种作用之间有着密切的联系(Borowitzka, 1981)。近年来,海洋中的生物钙化现象引起科学界的进一步关注。大气CO<sub>2</sub>浓度的升高将影响海水的pH值和不同形态碳元素的浓度,进而很可能影响海洋中的生物钙化过程(Gao *et al*, 1993a)。有关珊瑚藻类的钙化过程有过一些报道(Digby, 1977; Smith *et al*, 1979; Okazaki *et al*, 1982; Gao *et al*, 1993a),然而,有关其钙化程度的报道极少<sup>1)</sup>。本文报告3种珊瑚藻类:小珊瑚藻、异边孢藻和大边孢藻中的Ga、Mg及其无机碳酸盐的含量,以及藻体无机与有机态碳元素的比例,并对前两种藻类的光合作用固碳速度与钙化固碳速度进行了比较,以期为认识珊瑚藻类的钙化现象提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

实验用珊瑚藻样品于1991年4—6月采集。小珊瑚藻(*Corallina pilulifera*)和异边孢

\* 国家杰出青年科学基金资助项目,39625002号;中国科学院“百人计划”资助项目,1997年1月—1999年12月;日本关西电力公司资助项目。高坤山,男,出生于1958年9月,博士,研究员,现在中国科学院水生生物研究所藻类室,湖北武汉,邮编:430072, E-mail: ksgao@public.wh.hb.cn

1) Gao K, 1992. Studies on the Carbon Fixation of Macroalgae. In: Technical Report, Kansai Environmental Engineering Center. Osaka, Japan (in Japanese)

收稿日期:1996-06-19, 收修改稿日期:1998-05-08

藻 (*Marginisporum aberrans*) 采于日本海若狭湾高浜; 大边孢藻 (*Marginisporum crassissimum*) 采于日本太平洋海岸御坊美浜。采集水深在平均水面下 0.3—0.5m。

## 1.2 实验方法

**1.2.1 Ga、Mg 及其无机碳酸盐含量的测定** 将一定量干燥 (85℃, 24h) 的完整藻体置于盐酸溶液 (1mol/L) 中, 待藻体碳酸盐完全溶解后, 将藻体有机部分取出。用蒸馏水稀释溶液, 再将溶液调至 pH = 7—9 的范围内, 用蒸馏水稀释至一定容量, 以备分析用。用 HIC-6 型高效离子色谱仪 (日本岛津) 测定  $Ga^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  的浓度。藻体 Ga 与 Mg 的含量按公式:  $C = (N/1000) \times (V/W)$  计算, 式中,  $C$  表示藻体中  $Ga^{2+}$  或  $Mg^{2+}$  的含量 ( $\times 10^{-3}$ ),  $N$  表示溶液中  $Ga^{2+}$  或  $Mg^{2+}$  的浓度 (mg/L),  $V$  表示溶液的体积 (ml),  $W$  表示藻体的干重 (g)。根据 Ga 与 Mg 在  $CaCO_3$  和  $MgCO_3$  分子中的量比及藻体中 Ga 和 Mg 的含量, 可推算出藻体中  $CaCO_3$  和  $MgCO_3$  的含量。

**1.2.2 藻体无机与有机碳元素比例的估量** 根据  $CaCO_3$  与  $MgCO_3$  的分子量与碳在其分子中的量比, 计算出单位重量的  $CaCO_3$  或  $MgCO_3$  中碳元素的重量, 再根据每克藻体含有碳酸盐的量, 推算出单位重量藻体中无机态的碳元素量。有节珊瑚藻类有机物中碳元素的含量是 28.5% (Atkinson *et al.*, 1983)。根据此值与单位重量藻体中有机物的量, 可算出单位重量藻体中有机态的碳元素量; 最后计算出无机与有机态碳元素的比例。

**1.2.3 光合作用固碳与钙化固碳的测定** 选择小珊瑚藻和异边孢藻进行测定。光合作用固碳与钙化固碳 ( $CaCO_3$  沉积时碳的固定) 的总固碳量, 可利用含有藻体的培养瓶与不含藻体的对照瓶中海水中的溶解无机碳的差来计算。将藻体置于装有过滤海水的密闭瓶 (50ml) 内, 将瓶固定在恒温光照培养箱内的振荡器上, 在 20℃ 和  $300\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  或  $50\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的条件下, 培养 20min (培养时间如超过 20min 会导致钙化速度下降<sup>1)</sup> 后, 用 TOC-5000 型总碳分析仪 (日本岛津) 测定海水中无机碳元素浓度的变化。同时, 用高效离子色谱仪测定海水中  $Ga^{2+}$  浓度的变化。根据藻体培养瓶与对照瓶无机碳元素与  $Ga^{2+}$  浓度的差别, 分别计算出两种元素浓度的减少速度, 再根据藻体的量计算出单位藻体的总固碳速度和钙化速度。因为钙原子与碳原子在  $CaCO_3$  分子中的比例为 1:1, 所以按摩尔表示的  $Ga^{2+}$  沉积速度和与其相应的钙化固碳速度是相同的。将总固碳速度减去钙化固碳速度即得到光合作用固碳速度。

**1.2.4 数据处理** 在比较种之间 Ga、Mg 以及碳酸盐等成分或光合作用与钙化速度时, 使用了  $t$ -检验 ( $t$ -test) 法来鉴定差异的有意水平 ( $P$ ), 本文中有意水平定为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Ga、Mg 及其碳酸盐含量

小珊瑚藻、异边孢藻和大边孢藻三种珊瑚藻类的 Ga、Mg、 $CaCO_3$  和  $MgCO_3$  的含量见表 1。由表 1 可知, 小珊瑚藻、异边孢藻和大边孢藻中的 Ga 分别约占其干重的 28.0%、26.7% 和 26.3%; 小珊瑚藻的 Ga 含量比两种边孢藻的高 ( $P < 0.05$ ), 两种边孢藻的 Ga 含量之间没有明显的差别 ( $P > 0.4$ )。小珊瑚藻 Mg 的含量较低, 约占其干重的 2.8%, 而异边孢藻和大边孢藻的 Mg 含量约占其干重的 3.1%, 可见小珊瑚藻与两种边孢藻 Mg 含量的差别也

1) 同第 290 页脚注

表 1 珊瑚藻类中 Ca 与 Mg 元素的含量 ( $\times 10^{-3}$ 干重)、原子比 (Ca/Mg)、碳酸盐含量 (%) 以及无机态与有机态碳原子的量比 ( $C_{in}/C_{or}$ )

Tab.1 Ca and Mg contents ( $\times 10^{-3}$  dry wt), atomic ratio (Ca/Mg), carbonate contents (%) and atomic ratio of inorganic to organic carbon ( $C_{in}/C_{or}$ ) of the coralline algae

种 类	Ca	Mg	Ca/Mg	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	C <sub>in</sub> /C <sub>or</sub>
小珊瑚藻 ( <i>C. pilulifera</i> )	280.4±5.3	27.8±0.8	6.1±0.1	69.9±1.3	9.6±0.6	1.7±0.2
异边孢藻 ( <i>M. aberrans</i> )	267.4±7.7	30.6±0.7	5.3±0.1	66.7±1.9	10.6±0.2	1.5±0.1
大边孢藻 ( <i>M. crassissimum</i> )	263.3±5.5	31.4±1.6	5.1±0.2	65.7±1.4	10.9±0.5	1.4±0.1

注:表中数据表示为:平均值±标准差(n=5)

很明显 ( $P < 0.01$ )。另外,小珊瑚藻 CaCO<sub>3</sub>的含量约占干重的 70%,比两种边孢藻高 3%—4% ( $P < 0.05$ );而 MgCO<sub>3</sub>的含量约占干重的 10%,略低于两种边孢藻中 MgCO<sub>3</sub>的含量(约 11%);小珊瑚藻中 CaCO<sub>3</sub>与 MgCO<sub>3</sub>的总量约占藻体干重的 80%,虽然略高于两种边孢藻(约 77%),但差别不明显 ( $P > 0.1$ )。小珊瑚藻中 Ca 的含量高于两种边孢藻,而 Mg 的含量低于后两者,这种差异应该是属之间的差异,尚有待于进一步研究。

## 2.2 无机与有机碳元素的比例

由表 1 可知,三种藻类之间没有明显的差异 ( $P > 0.1$ ),藻体内的无机态的碳超过有机态的碳元素量,前者是后者的 1.4—1.7 倍。

## 2.3 光合作用固碳与钙化固碳的比较

小珊瑚藻和异边孢藻的光合作用固碳、钙化固碳以及总固碳速度见表 2。由表 2 可知,两种珊瑚藻与异边孢藻的光合作用固碳速度在强光条件下比钙化固碳速度快 ( $P < 0.01$ );而在弱光条件下比钙化固碳速度慢 ( $P < 0.01$ )。强光条件下的光合作用固碳与钙化固碳速度都超过弱光条件下的速度。小珊瑚藻的钙化固碳速度在强光和弱光条件下都比异边孢藻快;总固碳速度在强光下与异边孢藻差异极小 ( $P > 0.4$ ),在弱光下高于后者 ( $P < 0.01$ )。从两种光照下光合作用固碳与钙化固碳速度的变化幅度来看,钙化对光照强度变化的反应不像光合作用那么敏感。

表 2 小珊瑚藻与异边孢藻在两种不同光照下的光合作用固碳速度 ( $V_{or}$ ), 钙化固碳速度 ( $V_{in}$ ) 以及总固碳速度 ( $V_t$ ) [nmol C / (g · min) (干重)]

Tab.2 Carbon fixation rates by photosynthesis ( $V_{or}$ ), calcification ( $V_{in}$ ) and their total ( $V_t$ ) in *C. pilulifera* and *M. aberrans* under two light regimes

种 类	强光[300 $\mu$ mol/(m <sup>2</sup> · s)]			弱光[50 $\mu$ mol/(m <sup>2</sup> · s)]		
	$V_{or}$	$V_{in}$	$V_t$	$V_{or}$	$V_{in}$	$V_t$
小珊瑚藻 ( <i>C. pilulifera</i> )	700±56	540±37	985±68	78±18	212±37	290±22
异边孢藻 ( <i>M. aberrans</i> )	600±92	360±42	960±73	52±7	146±12	216±23

注:表中数据表示为:平均值±标准差(n=7)

海藻的光合作用固碳导致海水 pH 值升高 (Gao *et al.*, 1991, 1993b), pH 值升高有利于珊瑚藻类的钙化 (Gao *et al.*, 1993a), 因此珊瑚藻类的钙化对光合作用有依赖性。本文比较强、弱光照强度下小珊瑚藻与异边孢藻的钙化速度,证实了这两种珊瑚藻类的钙化对光的依赖性。小珊瑚藻和异边孢藻的碳酸盐含量约占其干重的 77%—80%,藻体内无机态

的碳元素含量是有机态的 1.5—1.7 倍,这表明其钙化固定的碳量比光合作用固定的碳量多。究其原因,虽然白天大部分时间的光照强度在  $300\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  以上,这段时间光合作用的固碳速度快,有机态碳元素的积累量高于无机态,但光合作用固碳只能在白天进行,而珊瑚藻类的钙化是昼夜不停地进行的(Gao *et al*, 1993a),另外,在夜间,光合作用的部分产物通过呼吸作用被消耗,这些都导致藻体中无机态碳的积累超过有机态碳。

### 3 结语

小珊瑚藻、异边孢藻及大边孢藻的碳酸盐含量约占藻体干重的 77%—80%,其中  $\text{CaCO}_3$  占 66%—70%,  $\text{MgCO}_3$  占 10%—11%。藻体中无机态碳元素的积累是有机态的 1.4—1.7 倍。珊瑚藻类的钙化受光照强度的影响,但对光照强度的依赖程度低于光合作用。

### 参 考 文 献

- Atkinson M J, Smith S V, 1983. C:N:P ratios of benthic marine plants. *Limnol Oceanogr*, 28:568—574
- Borowitzka M A, 1981. Photosynthesis and calcification in the articulated coralline red algae *Amphiroa anceps* and *A. foliacea*. *Mar Biol*, 62:17—23
- Digby P S B, 1977. Photosynthesis and respiration in the coralline algae, *Clathromorphum circumscriptum* and *Corallina officinalis* and the metabolic basis of calcification. *J Mar Biol Ass U K*, 57:1111—1124
- Gao K, Aruga Y, Asada K *et al*, 1991. Enhanced growth of the red alga *Porphyra yezoensis* Ueda in high  $\text{CO}_2$  concentrations. *J Appl Phycol*, 3:355—362
- Gao K, Aruga Y, Asada K *et al*, 1993a. Calcification in the articulated coralline alga *Carollina pilulifera*, with special reference to the effect of elevated atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Mar Biol*, 117:129—132
- Gao K, Aruga Y, Asada K *et al*, 1993b. Influence of enhanced  $\text{CO}_2$  on growth and photosynthesis of the red algae *Gracilaria* sp. and *G. chilensis*. *J Appl Phycol*, 5:563—571
- Okazaki M, Ichikawa K, Furuya K, 1982. Studies on the calcium carbonate deposition of algae. IV. Initial calcification site of calcareous red alga *Galaxaura fastigiata* Decaisne. *Bot Mar*, 25:511—517
- Smith A D, Roth A A, 1979. Effect of carbon dioxide concentration on calcification in the red coralline alga *Bossiella orbigniana*. *Mar Biol*, 52:217—225

## ON THE CALCIFICATION OF CORALLINE ALGAE

GAO Kun-shan

(Institute of Energy and Environmental Science, Shantou University, Shantou, 515063)

**Abstract** Samples of coralline algae were collected in Wakasa Bay, Japan Sea, during the period of April to June, 1991. The contents of calcium, magnesium and their carbonates, the ratio of inorganic to organic carbon and the carbon fixation rates by calcification and photosynthesis of *Coralline pilulifera*, *Marginisporum aberrans* and *M. crassissimum* were investigated in order to assess the extent of calcification in coralline algae. It was found that 77%—80% (weight) of the dry algal samples were made of the carbonates, 66%—70% calcium carbonate and 10%—11% magnesium carbonate. *C. pilulifera* contained more calcium and less magnesium than *M. aberrans* and *M. crassissimum*. All of the species contained more inorganic carbon than organic carbon; the ratio of inorganic to organic carbon was 1.4—1.7. Calcification in *C. pilulifera* and *M. aberrans* exceeded photosynthesis under low light intensity [ $(50\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ ], but was below it under high light intensity [ $(300\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ ]. The calcification process of the coralline algae is affected by light, but not so much as photosynthesis does.

**Key words** Seaweed Coralline algae Calcification Carbon element Photosynthesis

**Subject classification number** Q946.91