

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.06.012

王培,胡清菁,曹建华,等.念珠藻对岩溶水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  利用效率实验研究[J].广西植物,2014,34(6):799—805Wang P, Hu QJ, Cao JH, et al. Experimental study on utilization efficiency of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  in karst water by *Nostoc*[J]. *Guihaia*, 2014, 34(6): 799—805

# 念珠藻对岩溶水中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 利用效率实验研究

王培<sup>1,2</sup>, 胡清菁<sup>1,3</sup>, 曹建华<sup>1\*</sup>, 李亮<sup>4</sup>

(1. 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室(中国地质科学院岩溶地质研究所), 广西 桂林 541004;

2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 10083; 3. 广西大学 环境学院, 南宁

530004; 4. 桂林理工大学 环境学院, 广西 桂林 541006)

**摘要:** 岩溶碳汇过程中石灰石溶解将大气/土壤中  $\text{CO}_2$  转移到水体形成  $\text{HCO}_3^-$  促进水生藻类的生长。该文为了研究水生藻类光合作用将岩溶水中无机碳转化为有机碳的效率, 采用从岩溶水生生态系统中筛选出的念珠藻作为研究对象, 探讨在封闭体系中藻细胞光合作用时对典型岩溶水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  利用、藻细胞生物量的变化与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  的利用关系以及体系 pH、DO 的变化。结果表明: 念珠藻通过光合作用能吸收利用岩溶水中 27.38% 的  $\text{Ca}^{2+}$ , 同时将 29.54% 的  $\text{Ca}^{2+}$  通过物理化学作用以“藻体- $\text{CaCO}_3$ ”复合体形式沉淀而返回到无机环境。pH 漂移实验表明念珠藻光合作用过程中先利用水体中游离  $\text{CO}_2$ , 然后以岩溶水中  $\text{HCO}_3^-$  为碳源。由于水体中岩溶作用产生的  $\text{HCO}_3^-$  不断被光合作用利用而引起体系 pH 和 DO 的升高。念珠藻光合作用将岩溶水中 65% 的  $\text{HCO}_3^-$  转化为稳定化合物, 其中 18.46% 以胞外  $\text{CaCO}_3$  形式被沉淀, 81.54% 被藻类转化为有机物, 表现为净碳汇效应。

**关键词:** 念珠藻; 光合作用;  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{CaCO}_3$  沉积;  $\text{HCO}_3^-$ ; 净碳汇效应

**中图分类号:** P593 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2014)06-0799-07

## Experimental study on utilization efficiency of $\text{Ca}^{2+}$ and $\text{HCO}_3^-$ in karst water by *Nostoc*

WANG Pei<sup>1,2</sup>, HU Qing-Jing<sup>1,3</sup>, CAO Jian-Hua<sup>1\*</sup>, LI Liang<sup>4</sup>(1. *Karst Dynamics Laboratory, MLR & GZAR (Institute of Karst Geology, CAGS)*, Guilin 541004, China; 2. *School**of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences*, Beijing 10083, China; 3. *School of the**Environment, Guangxi University*, Nanning 530004, China; 4. *Department of Resource and**Environmental Engineering, Guilin University of Technology*, Guilin 541004, China)

**Abstract:** During the karst carbon sink process, the dissolution of limestone brings  $\text{CO}_2$  which came from atmosphere and soil to water to form  $\text{HCO}_3^-$ , it stimulates the growth of aquatic algae. In order to study the stability of karst carbon sink in the process of transforming inorganic carbon into organic carbon in aquatic algal photosynthesis, *Nostoc* which were screened in karst areas are used as the study object, probes into utilization of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  in typical karst water by algal photosynthesis in closed system, and the relationship between algal cell biomass change and the utilization of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  and as with the changes of pH and DO. The results showed that in the closed system 27.38%  $\text{Ca}^{2+}$  was absorbed by *Nostoc* cells through photosynthesis, and 29.54%  $\text{Ca}^{2+}$  was precipitated through physical and chemical effects in the form of “Algae- $\text{CaCO}_3$ ” complex and returned to the inorganic environment. In the

收稿日期: 2013-12-14 修回日期: 2014-02-17

基金项目: 中国地质调查局工作项目(1212011087120, 12120113005300); 岩溶动力学重点实验室基金(14-B-04)。

作者简介: 王培(1987-), 男, 湖北孝感人, 博士研究生, 主要从事生物地球化学研究, (E-mail) ecogene\_wp@163.com。

\*通讯作者: 曹建华, 博士, 研究员, 主要从事生物岩溶、岩溶地区元素生物地球化学、岩溶生态系统研究, (E-mail) jhcao@karst.edu.cn。

process of algal photosynthesis, free  $\text{CO}_2$  was used first, then  $\text{HCO}_3^-$  in karst water was used as carbon source in the closed system, and as with the using of  $\text{HCO}_3^-$ , the pH and DO correspondingly went up. At last in the closed system 65%  $\text{HCO}_3^-$  in karst water was used by *Nostoc* through its photosynthesis, and 18.46% of which were precipitated together with  $\text{Ca}^{2+}$  in the form of extracellular  $\text{CaCO}_3$ , 81.54% are transformed into steady organic matter by algae through its photosynthesis and then cycle in ecological system which shows net carbon sink effect.

**Key words:** *Nostoc*; photosynthesis;  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{CaCO}_3$  precipitation;  $\text{HCO}_3^-$ ; net carbon sink effect

全球变化科学的一个最重要的问题就是全球大气中  $\text{CO}_2$  的收支达不到平衡 (Broecker *et al.*, 1979; Houghton *et al.*, 1999; Joos, 1994; Schindler, 1999)。据估计, 20 世纪 80 年代期间, 人类平均每年向大气排放的  $\text{CO}_2$  约 7.1 Pg C, 比每年大气中积累的碳 ( $3.3 \pm 0.2$  Pg C) 和海洋吸收的碳 ( $2.0 \pm 0.8$  Pg C) 之和多 1.8 Pg C  $\cdot \text{a}^{-1}$ , 即可能存在一个未知的碳汇, 国外学者称其为遗失汇 (Missing sink) (Houghton *et al.*, 1998)。从目前对大气  $\text{CO}_2$  源汇研究结果来看, 要找的遗失汇最有可能存在于陆地生态系统中 (王秋凤等, 2012)。

对于遗失的碳汇, 多数地质学家认为岩溶作用在地质碳汇过程中起到特殊的作用 (袁道先, 2001; 刘再华, 2000), IGCP379“岩溶作用与全球碳循环” (1995~1999) 的研究结果表明现代我国碳酸盐岩溶蚀每年消耗大气  $\text{CO}_2$  的量达  $1.77 \times 10^7$  t C, 而全球碳酸盐岩溶蚀消耗大气  $\text{CO}_2$  的量达  $6.08 \times 10^8$  t C (袁道先等, 2003; 蒋忠诚等, 2013)。岩溶动力系统是地球表层的重要组成部分, 在地球表层系统中, 生物圈与相邻圈层间发生着物质和能量的交换过程, 使生物圈贯穿整个地球表层 (曹建华等, 2001)。

岩溶作用直接导致水体中含有大量  $\text{HCO}_3^-$ , 含量通常达到  $3 \sim 5$  mmol  $\cdot \text{L}^{-1}$ , 比外源水体高出几个数量级 (Cao *et al.*, 2003), 为水生藻类 (Liu *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2013) 提供大量的光合作用碳源, 大大促进了水生藻类的生长。为详细研究陆地和海洋生物群在生物地球化学循环中的作用, 自 1983 年以来, 国际科学联合会理事会制定了一项国际地质圈-生物圈研究计划 (IGBP), 并把藻类的生物地球化学研究作为重点。在生物地球化学循环中, 藻类生物是一类重要的生物类群。无论从时间尺度还是从其生物量尺度上来说, 藻类对生物地球化学元素的循环和对地质圈作用的能力都是最大的 (Wu, 1987)。因此, 揭示水生藻类生物作用与岩溶动力系统中碳循环之间的关系极为重要。

## 1 材料与方法

### 1.1 藻种来源

念珠藻 (*Nostoc*) 为蓝藻门 (Cyanophyta) 念珠藻目 (Nostocales), 属于原核生物, 无以核膜为界限的细胞核。细胞排列呈念珠状, 群集于胶团中, 小至肉眼不可见到大如胡桃。陆生种生长在潮湿土表、岩山上, 或混杂于藓类植物的茎叶间, 有的可在表土下生活; 水生种一般贴附在水底石块上, 或水生植物上生长; 浮游生活种较少; 山间溪流石块上亦有。

研究所用念珠藻 (*Nostoc* sp.) 来源于寨底地下河出口处沉水植物叶片上刮取, 并以 BG-11 培养基反复筛选获得纯种。利用 TU1810 紫外可见分光光度计测定其最大吸收峰为 685.00 nm (图 1)。

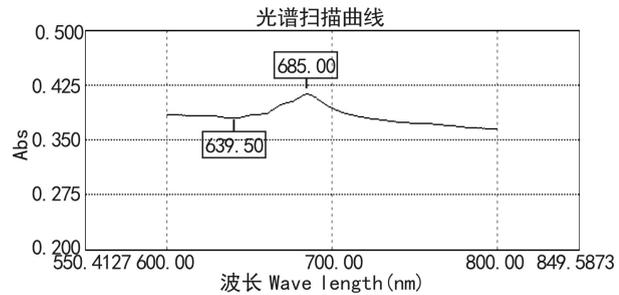


图 1 光谱扫描曲线

Fig. 1 Spectrographic scanning profile

### 1.2 岩溶水来源

采样点位于广西桂林市灵川县海洋乡和潮田乡境内的中国地质科学院岩溶地质研究所海洋-寨底地下河系统实验研究基地地下河出口处, 地理坐标为  $110^{\circ}33'24.51''$  E,  $25^{\circ}14'11.46''$  N。海洋-寨底地下河系统是目前最为典型的岩溶地下河系统之一。采集新鲜的表层岩溶水储存于便携式小冰箱中, 带回实验室并储存于  $4^{\circ}\text{C}$  冰箱中备用。水的化学指标见表 1。

表 1 寨底地下河出口处水化学特征

Table 1 Chemical compositions of underground water in Zhaidi

地点 Location	pH	温度 Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	EC ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	水化学指标 Chemical compositions of water ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )							
				$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	Cl	$\text{SO}_4^{2-}$
寨底 Zhaidi	7.84	20.8	337	0.63	65.00	0.78	0.86	244.00	0	1.29	1.51

### 1.3 培养实验

岩溶水用孔径为  $0.22 \mu\text{m}$  微孔滤膜抽滤, 替代双蒸水配置 BG-11 培养基, 培养基成分参照中国科学院典型培养物保藏委员会淡水藻种库 (FACHB), 去除其中  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 。培养基分装于 28 个体积均为 120 mL 聚乙烯瓶, 每瓶分装 100 mL 培养基液体。将 28 个聚乙烯瓶分为 A、B、C、D 四组, 往 A、B、C 三组每瓶各加入等量已知浓度念珠藻液, 其中 A、B 两组为平行实验组, C 组为  $\text{CaCO}_3$  沉淀跟踪组, D 组为不加藻液的岩溶水空白对照组。封闭体系组成为 100 mL 培养液、藻细胞、20 mL 空气柱。封口膜封口密封瓶塞, 置于恒温培养箱中光照培养。培养条件为温度 ( $28 \pm 1$ )  $^{\circ}\text{C}$ , 光强 3 000 lx, 全天光照培养。每隔 24 h 分别从 A、B、C、D 取出一瓶进行相关数据测量, 测完后舍弃, 持续 7 d。

### 1.4 监测指标及仪器

用 TU1810 紫外可见分光光度计在 685.00 nm 波长处测定藻细胞生物量。WTW350i 多功能水质参数分析仪来测量 pH, 溶解氧。  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  浓度分别用德国 Merck 公司生产的硬度试剂盒和碱度试剂盒测定。用浓度为  $9.704 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的标准 NaOH 溶液滴定水体中游离  $\text{CO}_2$ 。C 组中每天取一瓶, 先用  $0.22 \mu\text{m}$  微孔滤膜抽滤全部培养液, 晾干微孔滤膜及聚乙烯瓶, 再用稀  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  盐酸溶解滤膜上  $\text{CaCO}_3$  沉淀及瓶内  $\text{CaCO}_3$  沉淀并将溶解后的溶液混合, 定容到合适浓度, 利用 analytikjena ZEE nit 700 原子吸收仪 (Jena company, German) 测定其中  $\text{Ca}^{2+}$  含量以确定  $\text{CaCO}_3$  沉淀量。

### 1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 软件对数据进行处理和分析, 并利用 Origin8.5 软件绘图。

## 2 结果与分析

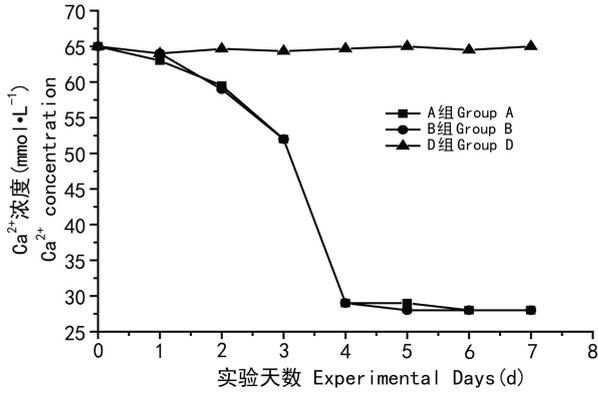
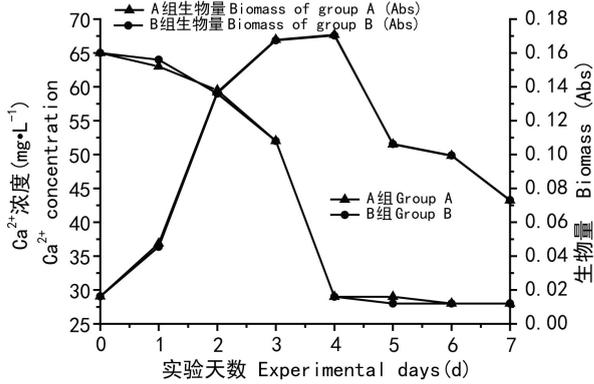
### 2.1 念珠藻对岩溶水中 $\text{Ca}^{2+}$ 利用

$\text{Ca}^{2+}$  是许多生物的生理功能元素和重要结构

成分, 在参与调解许多不同结构元素以及生理过程扮演着重要的角色 (Kazmierczak *et al.*, 1985; Clarkson *et al.*, 1980)。由图 2 可以看出, 在封闭体系中, 经过 7 d 的光照培养, A、B 两组  $\text{Ca}^{2+}$  浓度都从初始的  $65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  下降到  $28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 两平行组中  $\text{Ca}^{2+}$  均减少了  $0.0925 \text{ mmol}$ , 而 D 组  $\text{Ca}^{2+}$  浓度虽然有小幅波动, 但终浓度依旧保持为  $65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  没有变化。

2.1.1  $\text{Ca}^{2+}$  浓度与生物量关系 结合图 2 和图 3 可以看出, 与 D 组相比 A、B 两组加入念珠藻细胞后  $\text{Ca}^{2+}$  浓度出现下降, 表明伴随念珠藻光合作用进行藻细胞生物量不断增加, 水体中的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度不断减少至恒定, 原因是念珠藻光合作用过程中藻细胞数量在增加。一方面新增的藻细胞不断从岩溶水中吸收  $\text{Ca}^{2+}$  以维持细胞内正常新陈代谢。  $\text{Ca}^{2+}$  是控制生命体生长和死亡的重要信号因子, 生物细胞内  $\text{Ca}^{2+}$  必须保持在  $10^{-7.5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 过高的  $\text{Ca}^{2+}$  会对细胞产生毒害作用。在细胞分化过程中, 通过  $\text{Ca}^{2+}$  信号蛋白调控细胞分化, 从而在细胞尺度来控制生命体生长和凋亡 (Berridge *et al.*, 1998)。  $\text{Ca}^{2+}$  信号在参与这一方面已有研究, 并且蓝藻能通过放出胞内和吸收胞外  $\text{Ca}^{2+}$  的转运方式来感应和区别不同环境刺激 (Lu, 2010)。另一方面藻细胞吸收岩溶水中  $\text{Ca}^{2+}$  来维持细胞壁结构和功能 (Marcelle, 1990), 还对一些胞外膜蛋白或酶起调节作用。钙很容易进入质外体并在细胞质膜的外表面以可交换态的形式与细胞壁结合 (Hanson, 1984)。图 3 中随着念珠藻光合作用生物量的增加,  $\text{Ca}^{2+}$  不断减少, 当  $\text{Ca}^{2+}$  浓度减少达到恒定时, 此时体系中念珠藻生物量达最大, 在此之后藻细胞不断减少。出现此现象的主要原因是封闭体系对藻类种群数量有一个环境容纳量, 导致种群密度在此环境中呈现“S”型曲线增长。此外, 封闭体系中藻类光合作用无机碳源被消耗也是导致藻类出现剧减的主要原因。

2.1.2  $\text{Ca}^{2+}$  浓度与  $\text{CaCO}_3$  沉淀 由表 2 可以看出, 随着念珠藻光合作用进行, 封闭体系岩溶水中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度不断减少, 同时  $\text{CaCO}_3$  沉淀量不断增加。当

图 2 Ca<sup>2+</sup> 浓度变化曲线Fig. 2 Alteration curve of Ca<sup>2+</sup> concentration图 3 Ca<sup>2+</sup> 浓度与生物量变化曲线Fig. 3 Alteration curve between Ca<sup>2+</sup> concentration and biomass

Ca<sup>2+</sup> 浓度恒定后, CaCO<sub>3</sub> 沉淀量也达恒定。对 Ca<sup>2+</sup> 浓度变化与 CaCO<sub>3</sub> 沉淀量作相关性分析, 结果表明二者呈显著的负相关关系, 相关系数达 0.991。在海水、淡水以及土壤等环境中, 由于藻类光合作用存在 CaCO<sub>3</sub> 沉积也普遍存在。在钙化藻类中, 光合作用与钙化之间存在密切联系 (Borowitzka, 1980)。浮游钙化生物占全球生物钙化生产力的 80%, 而藻类生物是构成浮游钙化的主体 (Milliman, 1993)。念珠藻细胞在光合作用过程中会产生胞外 CaCO<sub>3</sub> 沉淀, 水生藻类在光合利用 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 时, 藻细胞表面会形成 CaCO<sub>3</sub> 沉淀区 (Walker *et al.*, 1982)。念珠藻细胞与胞外 CaCO<sub>3</sub> 形成“藻体-CaCO<sub>3</sub>”复合体, 当用 0.1 mol·L<sup>-1</sup> HCl 处理滤膜上念珠藻细胞后, 念珠藻细胞表面变得光滑、分布均匀。

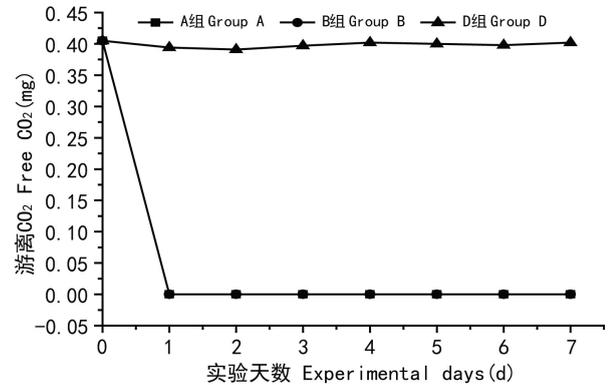
## 2.2 念珠藻对岩溶水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的利用

在岩溶水生生态系统中, 岩溶水 pH 值多在 7~9, 水体中的溶解无机碳主要以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的形式存

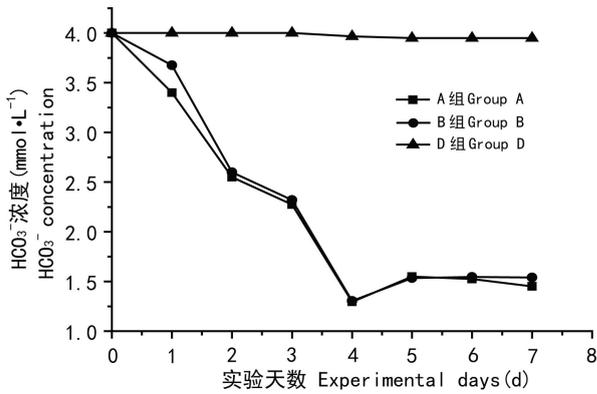
表 2 Ca<sup>2+</sup> 浓度与 CaCO<sub>3</sub> 沉淀量变化关系Table 2 Alteration curve between Ca<sup>2+</sup> concentration and CaCO<sub>3</sub> precipitation content

实验天数 Experimental days (d)	Ca <sup>2+</sup> 浓度 Ca <sup>2+</sup> concentration (mg·L <sup>-1</sup> )	CaCO <sub>3</sub> 沉淀量 Content of CaCO <sub>3</sub> Precipitation (mg)
0	65	0
1	64	0.2
2	59	1.1
3	52	2
4	29	3.9
5	28	4.8
6	28	4.8
7	28	4.8

在, 游离 CO<sub>2</sub> 含量较低。当 CO<sub>2</sub> 利用受到限制, 藻类会诱导产生大量碳酸酐酶 (Carbonic anhydrase, CA) 以环境中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为碳源进行光合作用 (Raven, 1979)。如图 4、5 可以看出, 在封闭体系中, 加入念珠藻后水体中游离 CO<sub>2</sub> 在第一天被耗尽, 同时 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 也相应有所减少。结果表明, 念珠藻光合作用过程中不以岩溶水中 CO<sub>2</sub> 为唯一碳源, 具有利用 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的能力。

图 4 游离 CO<sub>2</sub> 变化曲线Fig. 4 Alteration curve of free CO<sub>2</sub>

2.2.1 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度与 pH 关系 封闭体系中 pH 变化主要是水体中游离 CO<sub>2</sub> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 被藻类光合作用利用而引起。pH 漂移技术是目前研究无机碳利用机制和能力较为普遍的一种方法 (Spence *et al.*, 1985; Maberly, 1990)。其原理是利用密闭培养系统在一定条件下对藻类进行持续光照, 随着藻类光合作用对无机碳的利用, 水中无机碳不断减少, 导致 pH 不断升高。当无机碳减少到一定程度时, pH 则达到一个最大的稳定值 (pH 补偿点)。pH 接近 9 时, 游离 CO<sub>2</sub> 浓度接近于 0, 只利用 CO<sub>2</sub> 的藻类

图 5  $\text{HCO}_3^-$  浓度变化曲线Fig. 5 Alteration curve of  $\text{HCO}_3^-$  concentration

无法对无机碳继续利用来进一步提升 pH, 所以只利用  $\text{CO}_2$  的藻类 pH 补偿点在 9 左右。图 6 中加入念珠藻后第 1 天体系 pH 在 8.5 左右, 此时体系  $\text{HCO}_3^-$  也下降(图 5)。表明念珠藻 pH 补偿点低于 8.5。这与喜钙念珠藻 *Nosioc calcicola* Breb. 在岩溶水中进行光合作用时其 pH 补偿点为 8.17, 与李忠义等(2006)的结果基本一致。体系 pH 随着  $\text{HCO}_3^-$  被利用而不断升高, 到第 4 天时,  $\text{HCO}_3^-$  值达到最低, 此时体系 pH 达到最高值 9.94, 之后体系 pH 随有所波动, 但仍保持在 9.94 恒定。同时也表明封闭体系中 pH 升高主要是由于水体中  $\text{HCO}_3^-$  被藻类光合作用利用而引发。

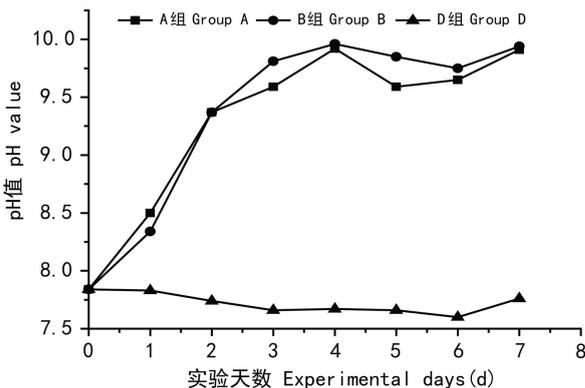


图 6 pH 变化曲线

Fig. 6 Alteration curve of pH

2.2.2  $\text{HCO}_3^-$  利用与溶解氧(Dissolved Oxygen)关系 光合作用是地球上最重要的化学反应, 它为地球上异养生物提供能量及氧气。大气中的氧均来自光合作用, 主要有辽阔海洋表层的浮游藻类和陆地生态系统的初级生产者产生。光合作用通式如下:

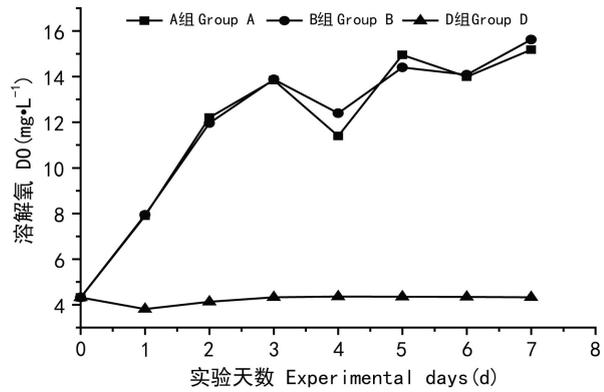


图 7 溶解氧变化曲线

Fig. 7 Alteration curve of DO

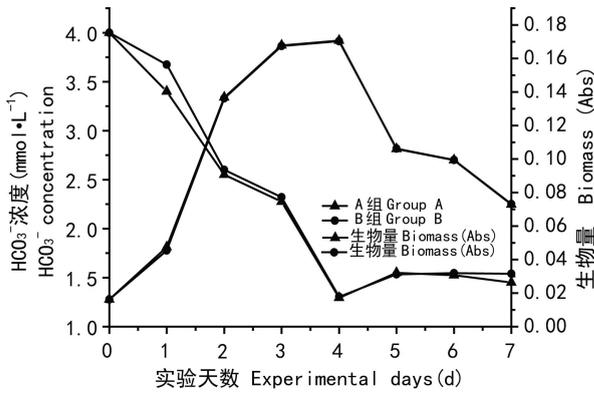


如图 7 封闭培养体系中随着念珠藻光合作用进行和念珠藻数量不断增加, 溶解氧不断升高。体系水体中溶解氧初始值为  $4.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。A、B 两平行实验组中由于藻类光合作用存在, 经 7 d 光照培养后分别增加到  $15.62$  和  $15.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。第 4 天体系中溶解氧发生波动的主要原因是第 4 天念珠藻数量达到最大, 此时藻类呼吸作用最强, 导致溶解氧出现小幅波动。

2.2.3  $\text{HCO}_3^-$  浓度与生物量关系 当封闭体系中低含量  $\text{CO}_2$  被耗尽后, 念珠藻光合作用主要以岩溶水中大量  $\text{HCO}_3^-$  为碳源进行光合作用。如图 4 和图 5 体系中游离  $\text{CO}_2$  从加入念珠藻后由  $0.123 \text{ mg}$  减少为 0, 同时  $\text{HCO}_3^-$  从  $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  最终下降到  $1.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。周红等(1997)研究表明碳酸酐酶(CA)是 CCM(carbon concentrating mechanism)中的重要组成部分, 促进 Rubisco(光合作用碳反应中重要的羧化酶)的羧化作用, 在水体中 DIC 主要以  $\text{HCO}_3^-$  形式存在的情况下, CA 可加速  $\text{HCO}_3^-$  向  $\text{CO}_2$  的转化, 为 Rubisco 提供有效底物, 可维持  $\text{CO}_2$  恒定不断地向细胞供应以进行光合作用。如图 8 看出随着念珠藻生物量不断增加, 水体中  $\text{HCO}_3^-$  不断减少, 第 4 天生物量达最大值时, 此时水体中  $\text{HCO}_3^-$  达最小值。从第 4 天开始, 封闭体系中藻细胞数剧减, 主要原因是由于在有限的封闭体系中念珠藻细胞为争夺有限的光合作用碳源  $\text{HCO}_3^-$  而导致藻细胞数量剧减。

### 2.3 念珠藻的碳汇转化量

封闭体系中初始  $\text{Ca}^{2+}$  浓度、 $\text{HCO}_3^-$  浓度分别为  $65$  和  $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 投入念珠藻细胞培养 7 d 后,

图8 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度与生物量变化曲线Fig. 8 Alteration curve between HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration and biomass

Ca<sup>2+</sup>浓度和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度分别为28和1.4 mmol · L<sup>-1</sup>,减少量分别为0.0925和0.26 mmol,其中分别有0.048 mmol的Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>以CaCO<sub>3</sub>沉淀的形式重新回到无机环境,其余减少量均被藻类光合作用转化为有机物。因此念珠藻光合作用将岩溶水中27.38%的Ca<sup>2+</sup>吸收利用,29.54%的Ca<sup>2+</sup>以胞外CaCO<sub>3</sub>形式重新回到无机环境并消耗等量HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,将53%的HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>转化为有机物从而进入生态系统中进行循环(表3)。

表3 念珠藻对岩溶水中Ca<sup>2+</sup>与HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>利用量Table 3 Use amount of Ca<sup>2+</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in karst water by *Nostoc*

类别 Type	净减少量 Net reduction content (mmol)	有机物 Organic matter (mmol)	CaCO <sub>3</sub> 沉淀量 CaCO <sub>3</sub> precipitation content (mmol)	利用率 Use ratio (%)
Ca <sup>2+</sup>	0.0925	0	0.048	27.38
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.26	0.212	0.048	53

2.3.1 陆地水生生态系统碳汇潜力 在念珠藻对封闭体系岩溶水体中Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>利用过程中可以看出,在有限的封闭体系中,生物生长的生态因子(光照、温度、水等)都适宜的情况下,藻类的生长受制于环境因子,即环境中Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、游离CO<sub>2</sub>的量。在岩溶水生生态系统中,限制藻类生长的主要因素是生态因子光照、温度等,而在我国岩溶区域主要分布于温度、光照等都比较适宜藻类生长的西南亚热带地区。严国安等(2001)详细总结了包括海洋、湖泊、水库和溪流等水生生态系统的碳循环过程及其对大气CO<sub>2</sub>的汇作用,并对水体生态系统碳循环和大气CO<sub>2</sub>汇的因素进行了讨论。据Downing等(1993)的研究表明,在湖泊中,碳酸钙的沉积具有

很大作用。全世界范围内,碳酸盐湖泊面积约1.6 × 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>,其对溶解无机碳的平均滞留率只有5 g · cm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>,则全世界湖泊对溶解无机碳的总汇估计可达到0.026 Gt g C · a<sup>-1</sup>,其中至少70%来源于大气CO<sub>2</sub>,约为0.018 2 Gt g C · a<sup>-1</sup>,湖泊总碳汇约为0.077 Gt g C · a<sup>-1</sup>,其中对大气CO<sub>2</sub>汇可达到0.053 2 Gt g C · a<sup>-1</sup>。因此,在岩溶水生生态系统中,藻类光合作用对岩溶碳汇效应的贡献是巨大的。

2.3.2 岩溶生态系统藻类碳汇潜力 在岩溶水生生态系统中,一方面高HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的岩溶水刺激水生藻类的生长从而将更多的无机碳转化为稳定的有机物形式;另外一方面藻类繁殖速度比较快,岩溶水中的Ca<sup>2+</sup>从分子和细胞水平促进水生藻类的增殖。从生态系统组成的角度出发,藻类是岩溶生态系统中最主要的生产者,担负着为整个生态系统提供能源的重任。在水生生态系统中藻类通过光合作用将岩溶作用产物利用从而促进整个生态系统的物质能量循环。因此,从系统的角度出发,岩溶水体中的藻类及水生植物的碳汇效应不容忽视。

### 3 结论

(1)念珠藻光合作用一方面通过细胞吸收大量岩溶环境中Ca<sup>2+</sup>,另外一方面藻类生长过程中还能够产生胞外CaCO<sub>3</sub>沉淀,并形成“藻体-CaCO<sub>3</sub>”复合体。念珠藻将一部分由于岩溶作用产生的HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>再沉淀也可以看作是在岩溶水生生态系统中藻类生物体的净碳汇作用。

(2)念珠藻对封闭体系中无机碳的利用是先利用培养体系中游离CO<sub>2</sub>,然后再利用水体中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>进行光合作用。念珠藻对水体中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的利用引起体系pH和DO的升高。

(3)念珠藻能将岩溶水中12%的HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>以CaCO<sub>3</sub>形式被再沉淀并返回给无机环境,53% HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>被藻类吸收利用转化为有机物从而进入到岩溶生态系统。此外,从生态系统能量流动角度看,藻类属于生态系统的初级生产者,藻类将岩溶水中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>吸收转化为有机物的过程中量是非常巨大的。从物质循环角度看,无机碳被藻类转化为有机碳,从而将地质圈的碳转化进入到生态系统,表现为净碳汇效应。

### 参考文献:

Berridge MJ, Bootman MD, Lipp P. 1998. Calcium, a life and death

- signal[J]. *Nature*, **395**:645—648
- Borowitzka MA. 1982. Mechanisms in algal calcification[J]. *Prog Phycol Res*, **1**:137—177
- Broecker WS, Takahashi T, Simpson HJ, et al. 1979. Fate of fossil fuel carbon dioxide and the global carbon budget[J]. *Science*, **206**:409—418
- Cao JH, Yuan DX, Chris G, et al. 2012. Carbon fluxes and sinks; the consumption of atmospheric and soil  $\text{CO}_2$  by carbonate rock dissolution[J]. *Acta Geol Sin*, **86**(4):963—972
- Cao JH(曹建华), Yuan DX(袁道先), Pan GX(潘根兴), et al. 2001. Preliminary Study on Biological Action in Karst Dynamic System(岩溶动力系统中的生物作用机理初探)[M]//Earth Science Frontiers(地学前缘). Beijing(北京): China University of Geosciences(中国地质大学), **8**(1):203—207
- Clarkson DT, Hanson JB. 1980. The mineral nutrition of higher plants[J]. *Ann Rev Plant Physiol*, **31**:239—298
- Downing JP, Meybeck M, Orr JC, et al. 1993. Land and water interface zones[J]. *Wat Air Soil Poll*, **70**:123—137
- Hanson JB. 1984. The function of calcium in plant nutrition[J]. *Adv Plant Nutr*, 1984, **1**:149—208
- Houghton RA, Davidson EA, Woodwell GM. 1998. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance[J]. *Glob Biogeochem Cycles*, **12**: 25—34
- Houghton RA, Hackler JL, Lawrence KT. 1999. The U. S. carbon budget: Contributions from land-use change[J]. *Science*, **285**: 574—578
- Jiang ZC(蒋忠诚), Qin XQ(覃小群), Cao JH(曹建华), et al. 2013. Significance and carbon sink effects of karst processes in global carbon cycle; Also reply to discussion on article 'Calculation of atmospheric  $\text{CO}_2$  sink formed in karst processes of karst divided regions in China'(论岩溶作用对全球碳循环的意义与碳汇效应——兼对《中国岩溶作用产生的大气  $\text{CO}_2$  碳汇分区估算一文商榷》的答复)[J]. *Carsol Sin*(中国岩溶), **32**(1):1—6
- Joos F. 1994. Imbalance in the budget[J]. *Nature*, **370**:181—182
- Kazmierczak J, Ittekkot V, Degens ET. 1985. Biocalcification through time: environmental challenge and cellular response[J]. *Ann Palaeontol*, **599**(1/2):15—33
- Li ZY(李忠义), Liu LF(刘立峰). 2006. The research on inorganic carbon utilization of *Nosioc calcicola* Breb.(喜钙念珠藻无机碳利用机制初步研究)[J]. <http://www.paper.edu.cn>.
- Liu ZH(刘再华). 2000. Two important carbon sink in atmospheric  $\text{CO}_2$ [J]. *Chin Sci Bull*(科学通报), **45**(21):2 348—2 351
- Liu Y, Liu ZH, Zhang JL, et al. 2010. Experimental study on the utilization of DIC by *Oocystis solitaria* Witttr and its influence on the precipitation of calcium carbonate in karst and non-karst waters[J]. *Carb Evap*, **25**(1):21—26
- Lu YZ. 2010. Research process of the calcium signaling in cyanobacteria[J]. *Mar Sci Bull*, **12**(2):26—31
- Maberly SC. 1990. Exogenous source of inorganic carbon for photosynthesis by marine microalgae[J]. *J Phycol*, **26**:439—449
- Marcelle RD. 1990. Predicting storage quality from preharvest fruit mineral analyses a review[J]. *Acta Hortic*, **274**:305—313
- Milliman JD. 1993. Production and accumulation of calcium carbonate in the ocean; Budget of a non-steady state[J]. *Glob Biogeochem Cycles*, **7**:927—957
- Raven JA. 1997. Inorganic carbon acquisition by marine autotrophs[J]. *Adv Bot Res*, **27**:85—209
- Schindler DW. 1999. Carbon cycling; the mysterious missing sink[J]. *Nature*, **398**:105—106
- Spence DHN, Maberly SC. 1985. Occurrence and ecological importance of  $\text{HCO}_3^-$  use among aquatic higher plants[M]//Lucas WWJ, Berry JA. (Eds.) Inorganic Carbon Uptake by Aquatic Photosynthetic Organisms. Maryland: American Society of Plant Physiologists:125—145
- WalkerJE, Saraste M, Runswick MJ, et al. 1982. Distantly related sequences in the alpha- and beta- subunits of ATP synthase, myosin, kinases and other ATP-requiring enzymes and a common nucleotide binding fold[J]. *Emb J*, **1**(8):945—951
- Wang P, Hu QJ, Yang H, et al. 2013. Preliminary study on the utilization of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  in the karst water by different sources of *Chlorella vulgaris*[J]. *Carb Evap*. DOI:10. 1007/s13146-013-0170-5
- Wu QY. 1987. Algae creatures and the nature of the biogeochemical cycle of carbon dioxide[J]. *Expl Nat*, **6**(21):44—46
- Wang QF(王秋凤), Liu YH(刘颖慧), He NP(何念鹏), et al. 2012. Demands and key scientific issues in the synthesis research on regional terrestrial ecosystem carbon budget in China(中国区域陆地生态系统碳收支综合研究的科技需求与重要科学问题)[J]. *Progr Geogr*(地理科学进展), **31**(1):78—87
- Yan GA(严国安), Liu YD(刘永定). 2001. Aquatic ecosystems; carbon cycle and as atmospheric  $\text{CO}_2$  sink(水生生态系统的碳循环及对大气  $\text{CO}_2$  的汇)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **21**(5):827—833
- Yuan DX(袁道先). 1999. Progress in the study on karst processes and carbon cycle(“岩溶作用与碳循环”研究进展)[J]. *Adv Earth Sci*(地球科学进展), **14**(5):425—431
- Yuan DX(袁道先). 2001. Carbon cycle in earth system and its effects on environment and resources(地球系统的碳循环和资源环境效应)[J]. *Quat Sci*(第四纪研究), **21**(3):223—232
- Yuan DX. 1998. Contribution of IGCP 379“karst processes and carbon cycle” to global change[J]. *Episodes*, **21**(3):198
- Zhou H(周红), Ren JC(任久长), Cai XM(蔡晓明). 1997. The concept and measurement of diurnal light compensation point of submerged macrophyte(沉水植物昼夜光补偿点及其测定)[J]. *Acta Sci Circumst*(环境科学学报), **17**(2):256—258