

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

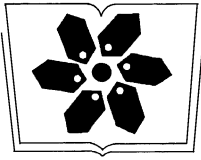
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第5期 Vol.32 No.5 **2012**

中国生态学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 5 期      2012 年 3 月 (半月刊)

## 目 次

淀山湖富营养化过程的统计学特征 .....	程 曦, 李小平, 陈小华 (1355)
拟水狼蛛对食物中镉的吸收和排泄及生物学响应 .....	张征田, 张光铎, 张虎成, 等 (1363)
接种后共培养时间对丛枝菌根喜树幼苗喜树碱含量的影响 .....	于 洋, 于 涛, 王 洋, 等 (1370)
沙尘暴发生日数与空气湿度和植物物候的关系——以民勤荒漠区为例 .....	常兆丰, 王耀琳, 韩福贵, 等 (1378)
西藏牦牛 mtDNA D-loop 区的遗传多样性及其遗传分化 .....	张成福, 徐利娟, 姬秋梅, 等 (1387)
红松阔叶混交林林隙土壤水分分布格局的地统计学分析 .....	李 猛, 段文标, 陈立新, 等 (1396)
黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征 .....	邢肖毅, 黄懿梅, 黄海波, 等 (1403)
毛竹高速生长期土壤碳氮动态及其微生物特性 .....	王雪芹, 张奇春, 姚槐应 (1412)
长期 N 添加对典型草原几个物种叶片性状的影响 .....	黄菊莹, 余海龙, 袁志友, 等 (1419)
接种 AMF 对菌根植物和非菌根植物竞争的影响 .....	张宇亭, 王文华, 申 鸿, 等 (1428)
福州大叶榕隐头果内的小蜂群落结构与多样性 .....	吴文珊, 陈友铃, 蔡美满, 等 (1436)
不同生境朝鲜淫羊藿生长与光合特征 .....	张永刚, 韩 梅, 韩忠明, 等 (1442)
基于日均温度的华山松径向生长敏感温度研究 .....	封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等 (1450)
长江三峡库区蝶类群落的等级多样性指数 .....	马 琦, 李爱民, 邓合黎 (1458)
甜瓜幼苗叶片光合变化特性 .....	韩瑞锋, 李建明, 胡晓辉, 等 (1471)
双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响 .....	唐海明, 肖小平, 帅细强, 等 (1481)
古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响 .....	曾晓玲, 刘 彤, 张卫宾, 等 (1490)
流溪河水库颗粒有机物及浮游动物碳、氮稳定同位素特征 .....	宁加佳, 刘 辉, 古滨河, 等 (1502)
采用本土蔬菜种子替代水藓评价污泥有机腐熟度 .....	刘颂颂, 许田芬, 吴启堂, 等 (1510)
人为营养物质输入对汉丰湖不同营养级生物的影响——稳定 C、N 同位素分析 .....	李 斌, 王志坚, 金 丽, 等 (1519)
流沙湾海草床海域浮游植物的时空分布及其影响因素 .....	张才学, 陈慧妍, 孙省利, 等 (1527)
福寿螺的过冷却研究 .....	赵本良, 章家恩, 罗明珠, 等 (1538)
水稻生育期对褐飞虱和白背飞虱卵巢发育及起飞行为的影响 .....	陈 宇, 傅 强, 赖凤香, 等 (1546)
绿盲蝽越冬卵的耐寒能力 .....	卓德干, 李照会, 门兴元, 等 (1553)
陆桥岛屿环境下社鼠种群数量的估算方法 .....	张 旭, 鲍毅新, 刘 军, 等 (1562)
北京市居民食物消费碳足迹 .....	吴 燕, 王效科, 逯 非 (1570)
社会经济系统磷物质流分析——以安徽省含山县为例 .....	傅银银, 袁增伟, 武慧君, 等 (1578)
内陆河流域试验拍卖水权定价影响因素——以黑河流域甘州区为例 .....	邓晓红, 徐中民 (1587)
<b>专论与综述</b>	
台风对森林的影响 .....	刘 斌, 潘 澜, 薛 立 (1596)
海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响研究进展 .....	张成龙, 黄 晖, 黄良民, 等 (1606)
三种外来入侵斑潜蝇种间竞争研究进展 .....	相君成, 雷仲仁, 王海鸿, 等 (1616)
沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义 .....	于 宇, 宋金明, 李学刚, 等 (1623)
异化 Fe(III) 还原微生物研究进展 .....	黎慧娟, 彭静静 (1633)
<b>问题讨论</b>	
锡林郭勒盟生态脆弱性 .....	徐广才, 康慕谊, Marc Metzger, 等 (1643)
<b>研究简报</b>	
哥斯达黎加外海夏季表层浮游动物种类组成及分布 .....	刘必林, 陈新军, 贾 涛, 等 (1654)



**封面图说:** 气候变暖下的北极冰盖——自从 1978 年人类对北极冰盖进行遥感监测以来, 北极冰正以平均每年 8.5% 的速度持续缩小, 每年 1500 亿吨的速度在融化。这使科学家相信, 冰盖缩小的根本原因是全球变暖。北极的冰盖消失, 让更大面积的深色海水暴露出来, 使海水吸收更多太阳热辐射反过来又加剧冰盖融化。由于北极冰的加速融化, 北冰洋的通航已经成为 21 世纪初全球最重要的自然地理事件和生态事件。从这张航片可以看到北极冰缘正在消融、开裂崩塌的现状。

**彩图提供:** 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201011011560

张成龙, 黄晖, 黄良民, 刘胜. 海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响研究进展. 生态学报, 2012, 32(5): 1606-1615.

Zhang C L, Huang H, Huang L M, Liu S. Research progress on the effects of ocean acidification on coral reef ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5): 1606-1615.

## 海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响研究进展

张成龙<sup>1,2,3</sup>, 黄 晖<sup>1,\*</sup>, 黄良民<sup>1</sup>, 刘 胜<sup>1</sup>

(1. 中国科学院海洋生物资源可持续利用重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;

2. 中国科学院海南热带海洋生物实验站, 三亚 572000; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 目前, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度的升高已导致海水 pH 值比工业革命前下降了约 0.1, 海水碳酸盐平衡体系随之变化, 进而影响珊瑚礁生态系统的健康。近年来的研究表明海洋酸化导致造礁石珊瑚幼体补充和群落恢复更加困难, 造礁石珊瑚和其它造礁生物 (Reef-building organisms) 钙化率降低甚至溶解, 乃至影响珊瑚礁鱼类的生命活动。虽然海洋酸化对造礁石珊瑚光合作用的影响不显著, 但珊瑚-虫黄藻共生体系会受到一定影响。建议选择典型海区进行长期系统监测, 结合室内与原位模拟试验, 从个体、种群、群落到系统不同层面, 运用生理学和分子生物学技术, 结合生态学研究手段, 综合研究珊瑚的相应响应, 以期深入认识海洋酸化对珊瑚礁生态系统健康 (例如珊瑚白化) 的影响及其效应。

**关键词:** CO<sub>2</sub>; 海洋酸化; 碳酸盐平衡体系; 珊瑚礁; 钙化率

### Research progress on the effects of ocean acidification on coral reef ecosystems

ZHANG Chenglong<sup>1,2,3</sup>, HUANG Hui<sup>1,\*</sup>, HUANG Liangmin<sup>1</sup>, LIU Sheng<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Marine Bioresources Sustainable Utilization, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2 National Experiment Station of Tropical Marine Biology, Sanya 572000, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Ocean acidification is one of obvious and serious environmental issues caused by increasing CO<sub>2</sub> levels in the atmosphere. Seawater pH has decreased by about 0.1 units since the industrial revolution and the carbonate equilibrium has been changing to become detrimental to the health of coral reef ecosystems around the world.

Recent studies revealed that ocean acidification has decreased the calcification rate of scleractinian corals and other reef-building organisms, while promoting the dissolution rate. Models based on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) business-as-usual emission scenarios suggest that atmospheric CO<sub>2</sub> levels could approach 800  $\mu\text{L/L}$  near the end of this century. Under this scenario, carbonate ion concentrations and aragonite saturation in surface seawater will be substantially reduced, and coral reef ecosystems around the world would experience net dissolution. No obvious influences were detected on the photosynthesis of coral symbionts, but the symbiosis system of corals and zooxanthellae could be affected. Corals would be more susceptible to bleaching with further ocean acidification, especially with simultaneously increasing temperatures. Studies showed that ocean acidification led to serious problems with larval recruitment, and affected the metabolism and reproduction of coral-reef organisms. It is believed that early developmental and reproductive stages of calcifying organisms are the points within a life cycle most vulnerable to environmental change. Laboratory experiments revealed that ocean acidification has negative impacts on the fertilization, cleavage, larva,

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目 (2009BAB44B01); 国家海洋局公益性项目 (201105012-2, 201005012-6)

**收稿日期:** 2010-11-01; **修订日期:** 2011-11-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: coral@scsio.ac.cn

settlement and reproductive stages of several marine calcifiers. Therefore future ocean acidification will potentially impact the population size and dynamics, as well as the community structure of calcifiers, and will have negative impacts on coral reef ecosystems.

However, ocean acidification often has non-lethal and species-specific impacts on various species of coral. It is necessary to distinguish different species and different processes of metabolism in corals, when considering the impacts of ocean acidification. The research on ocean acidification is relatively new and the mechanisms behind ocean acidification affecting reef ecosystems are poorly understood. Nevertheless, the impacts of ocean acidification on coral reef ecosystems are indisputable. With increasing pressures from global climate change and human activities, other stress factors, such as global warming, sedimentation and eutrophication emerged, and would have synergistic impacts with ocean acidification on coral reef ecosystems, driving reefs toward the tipping point for functional collapse. Scientific evidence indicates that coral reefs have deteriorated rapidly in the past few decades and the future prospects for coral reefs are poor.

Despite an urgent need for action, our knowledge on the impacts of ocean acidification on coral reef ecosystems and dependent organisms is still very limited. In order to clearly understand the effects of ocean acidification on coral disease (such as coral bleaching), we suggest that a long-term and systematic monitoring system, including laboratory and in-situ experiments, should be established. Physiological, molecular and ecological methods should be utilized to study the coral reef ecosystem on individual, population, community and ecosystem levels. Studies should also focus on the adaptive capability of marine organisms, which will be important to forecast how coral reef ecosystems will respond to ocean acidification.

**Key Words:** CO<sub>2</sub>; ocean acidification; carbonate equilibrium system; coral reef; calcification rates

大气 CO<sub>2</sub> 浓度对全球气候系统乃至各种生态系统起着关键的调控作用<sup>[1-2]</sup>。在工业革命之前的 42 万年期间,大气 CO<sub>2</sub> 浓度基本在 180—300 μL/L 之间波动<sup>[3-5]</sup>,工业革命以来的 200 多年间(尤其是近几十年来)却持续攀升了近 40%,目前约为 390 μL/L(根据 NOAA 在 Mauna Loa 的观测数据)<sup>[6]</sup>,全球变化随之发生——全球升温、海洋酸化等<sup>[7]</sup>。大气中 CO<sub>2</sub> 通过水-气交换溶于海洋以达到水-气平衡,而持续升高的大气 CO<sub>2</sub> 浓度改变了海洋水化学系统,尤其是打破了原有的碳酸盐平衡体系,降低了海水中的 pH 值、碳酸根离子浓度([CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>])、碳酸钙(包括文石和方解石)饱和度<sup>[8]</sup>,从而导致海洋酸化。

自 20 世纪 50 年代以来,大气中 CO<sub>2</sub> 浓度升高和海洋酸化现象逐渐引起关注。全球海洋通量研究(Joint Global Ocean Flux Study)证明了大气中 CO<sub>2</sub> 向海洋中的扩散现象以及海洋酸化现象的发生<sup>[9]</sup>。海洋酸化直接影响着海洋生态系统的结构与健康,就珊瑚礁生态系统而言,海洋酸化甚至是决定未来珊瑚礁存亡的关键因子,持续酸化可能引发第六次生物大灭绝<sup>[10-11]</sup>。大气中 CO<sub>2</sub> 浓度上升对珊瑚礁生态系统的影响是多方面的(图 1)。本文就目前的研究进行了分析总结,以为今后研究工作提供参考。

## 1 海洋酸化使海水碳酸盐平衡体系发生重大改变

海洋连续观测(夏威夷海洋时间序列(HOTS)、百慕大-大西洋时间序列(BATS)和在 Canary 群岛进行的欧洲站时间序列(ESTOC))的资料显示,海水碳酸盐平衡体系的变动和大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的趋势是一致的<sup>[12-14]</sup>。海水碳酸盐平衡体系的改变同时伴随着海洋酸化进程,目前就海洋酸化对海洋生物的影响研究,实质上探讨的就是在海洋酸化背景下发生变动的海水碳酸盐平衡体系对海洋生物的影响,它对海洋生物的影响远比单一 pH 值的降低的影响更重要(表 1),其中变动较大的几个参数分别是:pH 值、P(CO<sub>2</sub>)、溶解态 CO<sub>2</sub> 和碳酸钙(包括文石和方解石)饱和度(由[CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>]的变动体现),TA 和 DIC 在短时间尺度上的变动不大。

实验研究表明,水体 P(CO<sub>2</sub>)和溶解态 CO<sub>2</sub> 浓度的升高可能会导致海洋生物光合作用效率的改变,如导致海草类光合作用效率提高,而对造礁石珊瑚等的影响不显著<sup>[10-11,15]</sup>,造礁石珊瑚钙化率与 P(CO<sub>2</sub>)成反

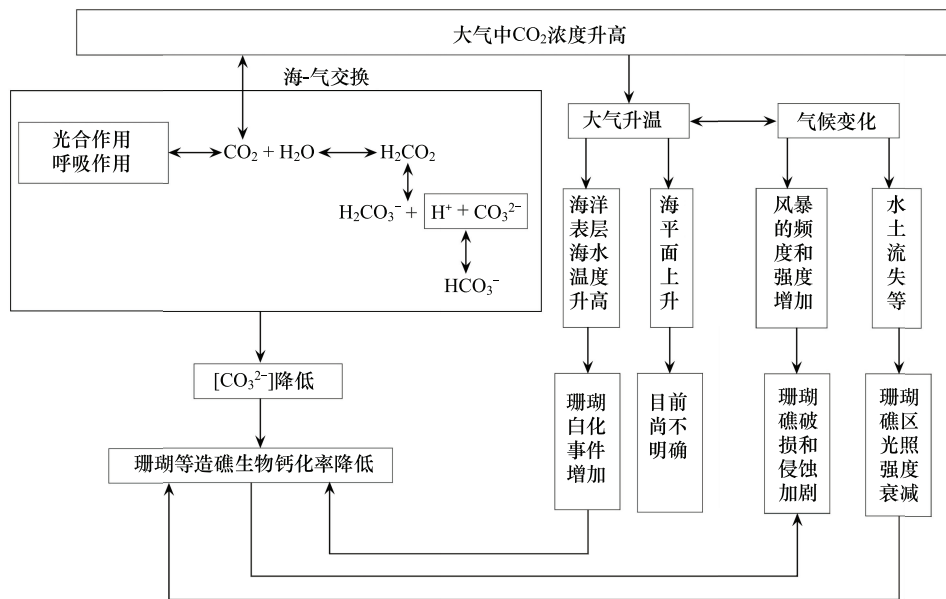


图1 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的效应及其对珊瑚礁生态系统的影响

Fig. 1 Effects of the atmosphere pCO<sub>2</sub> evaluation and its impacts on the coral reef ecosystems

比<sup>[16-18]</sup>,与pH值和碳酸钙饱和度成正比<sup>[19]</sup>。而碳酸盐体系的其它参数(溶解无机碳(DIC)和总碱度(TA))对珊瑚礁系统中生物活动的直接影响不显著。有很多实验直接的调控对象虽然是DIC,PCO<sub>2</sub>或pH值,但海水碳酸盐平衡体系是一个复杂的整体,当其中的任何一个参数改变,必定引起其它参数相应的改变,大多数实验研究中的参数控制本质上导致了[CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>]改变。几乎所有的研究都表明造礁石珊瑚和其它海洋钙化生物的钙化活动对水体中碳酸钙饱和度(或[CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>])是敏感的<sup>[20-23]</sup>。

表1 工业革命以来海水碳酸盐体系参数的改变及其对珊瑚礁生态系统生物活动的影响

Table 1 Changes of the carbonate system parameters and its impacts on the biological activities of organisms in coral reef ecosystem since the industrial revolution

海水碳酸盐体系参数 Seawater carbonate system parameters	工业革命以来的改变 Changes since industrial revolution	对珊瑚礁生态系统生物活动的影响 Impacts on the biological activities in coral reef ecosystem	参考文献 References
海水 P(CO <sub>2</sub> )	约升高了40%;表层海水 P(CO <sub>2</sub> )与大气变化趋势基本一致	可能促进海藻等的光合作用,但对珊瑚虫黄藻的光合作用无显著影响	[16-18] [7,24-25]
pH 值	降低了0.1左右,到本世纪中叶将比现在再下降0.14左右	影响营养盐和微量元素的存在形式与其生物地球化学循环,从而间接影响海洋生物的生命活动	[7,24,26] [27]
[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ]	降低了16%	海洋钙化生物钙化率降低	[7,24]
[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	升高了约5%	增加幅度较小,对海洋生物生理活动影响不大	[7,24]
文石饱和度	降低了16%,到本世纪中叶,其在全球大部分珊瑚礁海域将降到3以下	导致珊瑚及珊瑚藻等海洋钙化生物钙化率降低	[7,20-21] [22-24]
方解石饱和度	降低了16%	导致颗石藻类及有孔虫等海洋钙化生物钙化率降低	[7,24]
总溶解无机碳(DIC)	升高了约3%	其增加幅度较小,对海洋生物生理活动的影响不大	[7,24,26] [27]
总碱度(TA)	基本不变(除非发生大规模的溶解现象)	无显著影响	[7,24,26] [27]

## 2 海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响

### 2.1 对造礁石珊瑚的影响

造礁石珊瑚是珊瑚礁体的主要建造者(为其它珊瑚礁生物构建生境),也是海洋钙化生物的典型代表。目前关于海洋酸化对造礁石珊瑚的影响的研究多集中在钙化方面,而对造礁石珊瑚其它生理活动过程和对珊瑚礁生态系统中其它生物群落的影响目前还知之甚少。研究表明,当大气中  $\text{CO}_2$  浓度加倍时( $560 \mu\text{L/L}$ ),海水 pH 值将会比现在再下降 0.14,鹿角珊瑚和滨珊瑚等几种造礁石珊瑚的钙化率将分别下降 3%—60%<sup>[18,20,22]</sup>,而造礁石珊瑚的光合作用效率却可能变化不显著<sup>[15,28]</sup>。

#### 2.1.1 造礁石珊瑚钙化率降低

Marubini<sup>[22]</sup>等采用一种造礁石珊瑚(*Porites compressa*)进行的模拟实验表明,与冰川时期相比,到 2100 年造礁石珊瑚的钙化率将下降 30%;即使与现在相比,到 2100 年造礁石珊瑚的钙化率仍将下降 11%。来自“生物圈 2 号”对滨珊瑚等开展的胁迫实验进一步表明<sup>[17,21,29]</sup>:1)钙化率与 $[\text{CO}_3^{2-}]$ 或文石饱和度( $\Omega_{\text{arag}}$ )是成正相关的;2)钙化率的变化和 $[\text{HCO}_3^-]$ 没有显著的相关关系;3)当 $[\text{CO}_3^{2-}]$ 从工业革命前的  $272 \mu\text{mol/kg}$  降低到  $177 \mu\text{mol/kg}$ ( $P(\text{CO}_2)$ 为  $560 \mu\text{L/L}$ )时,珊瑚礁钙化率将下降 49%。总之,随着海洋酸化的加剧,造礁石珊瑚的钙化率将会随之降低。

#### 2.1.2 珊瑚-虫黄藻共生体系将受到破坏

共生藻吸收光能和营养盐,进行光合作用,为珊瑚体提供其代谢所需营养物质和能量的 95% 以上<sup>[30]</sup>。正是由于共生藻的这种供给,珊瑚才能够维持较高的钙化率<sup>[31]</sup>。Anthony<sup>[32]</sup>等人研究表明,海洋酸化可能导致造礁石珊瑚白化,使珊瑚-虫黄藻共生体系受到破坏。但是,目前关于造礁石珊瑚钙化活动与光合作用之间的相互关系还存在较大争议,在海洋酸化背景下,珊瑚-虫黄藻共生体系将会受到怎样的影响还需要更多的实验研究。

#### 2.1.3 幼体补充和群落恢复将更加困难

珊瑚藻(*Coralline alga*)对造礁石珊瑚幼体附着起着非常关键的作用<sup>[33-34]</sup>,但其对海洋酸化很敏感,以现有的海水酸化趋势计算,大部分珊瑚藻将在未来二三十年内消失<sup>[35]</sup>。因此,海洋酸化对珊瑚有性繁殖过程将有可能造成重大影响。另外,在全球变化和人类活动的影响下,造礁石珊瑚死亡以后,为大型藻类入侵留出了空间。大型藻类的附着生长制约了珊瑚繁殖和生长,因为藻类会与珊瑚竞争光和生存空间,而且它们还会释放化学毒素阻止其它生物附着。

目前就海水酸化对造礁石珊瑚的实验结果而言,存在着容易导致混乱的两个方面:(1)海洋酸化本身对珊瑚虫不构成致命的影响。Fine 的实验表明某些种类的珊瑚体能够在较低 pH 值条件下存活,即使此时其净钙化为负或零<sup>[36]</sup>,因此珊瑚虫可以在较高  $P(\text{CO}_2)$  条件下生存。所以,并不是所有的生理过程都直接受海洋酸化的胁迫,要区分具体的过程和作用强度。(2)造礁石珊瑚以及其它海洋生物对海洋酸化的响应存在着较大的种间差异性,导致某些同类实验之间的可比性很差。采用不同的实验品种得出的结论差异可能很大,若不加以区分,将导致相互矛盾的假象。因此,在进行相关研究分析的时候,需要注意实验对象和实验方法的一致性。

### 2.2 海洋酸化促进珊瑚礁系统的溶解现象

海洋酸化不仅能导致珊瑚礁系统中钙化生物钙化率的降低,还会促进珊瑚礁系统内的溶解现象。研究表明,即使是在健康的珊瑚礁区,溶解现象也是伴随钙化同时发生的,只是由于钙化率大于溶解率,整个礁区通常表现为净钙化。但是,随着海洋酸化的加剧,珊瑚礁的溶解速率不断升高,当溶解速度达到或超过其钙化速度,某些珊瑚礁将可能出现负生长。此类现象在一些退化的边缘礁上已经被观测到了。例如,Suzuki 等人在日本西南部海域通过对野外珊瑚礁的观测发现,珊瑚礁在夜间有净溶解现象<sup>[37]</sup>。Gattuso 等人观测了一个由于受全球变化和人类活动影响而转变成“藻礁”(Algae-dominated reefs)的边缘礁(Moorea),发现整个礁体在以  $0.8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  的速度溶解<sup>[38]</sup>。Walter 和 Burton 在海岸潮间带也作了类似的实验,发现此珊瑚礁体在以

13.7 mmolCaCO<sub>3</sub>m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 速度溶解<sup>[39]</sup>。在大洋区珊瑚礁上发生的溶解现象一般是较微弱的,但是在海岸带附近的溶解现象则较为剧烈<sup>[7]</sup>。所以,随着海洋酸化的加剧,某些不健康的珊瑚礁将首先出现净溶解现象。而健康的珊瑚礁能够在一定程度上抵消溶解量,推迟净溶解状态到来的时间。但是已有大量模拟实验(如“生物圈2号”的实验)结果表明当大气中CO<sub>2</sub>浓度达到560 μL/L时,全球大部分珊瑚礁海域水体文石饱和度将下降到3.0以下。届时,即使是健康的珊瑚礁,其溶解速率和钙化速率将大致相等,全球范围内的珊瑚礁将面临着从净增长的状态向净损耗状态的转变<sup>[40]</sup>。

### 2.3 对珊瑚礁区其它关键功能生物的影响

近年来,随着研究的深入,海洋酸化对珊瑚礁区其它生物种群的影响略有一些报道,主要的生物种群包括:珊瑚藻、底栖生物群落、鱼类等。

珊瑚藻是珊瑚礁生态系统中的关键成员之一,为珊瑚礁体的稳固起到“粘合剂”的作用,而且是海胆、鹦嘴鱼及一些软体动物重要的食物来源<sup>[41-42]</sup>。同时壳状珊瑚藻也为珊瑚幼虫提供重要的硬质附着底质<sup>[43]</sup>。但近年来的研究表明,海洋酸化会对导致珊瑚藻钙化率显著降低,对该种群的未来自可能产生致命的影响<sup>[35]</sup>。

珊瑚礁区的底栖软体动物、苔藓虫与棘皮动物对维持珊瑚礁立体结构至关重要。有研究表明双壳类动物的钙化率会受海洋酸化的影响而下降<sup>[44]</sup>。另外,由于生物早期生命阶段比成熟期对环境干扰更加敏感,大多数底栖钙化生物会经历浮游幼虫期中的幼虫波动期,因此海洋酸化可能对它们的幼体阶段影响较大<sup>[45-46]</sup>。例如,Kurihara<sup>[47]</sup>等研究CO<sub>2</sub>分压升高对两种海胆的受精率及胚胎幼虫形态学的影响,发现随着CO<sub>2</sub>浓度升高两种海胆的受精率都下降,两个种类的长腕幼虫的数量都下降,而且在两种幼虫期都发现有骨骼畸形。所以,海洋酸化很可能会影响许多海洋生物早期生长和生活史,这将会对海洋生态系统产生严重的影响。

珊瑚礁鱼类是珊瑚礁生态系统中重要的组成部分,对珊瑚礁生态系统物质循环起着十分重要的作用,对维护珊瑚礁的系统健康具有非常重要的意义。海水CO<sub>2</sub>分压升高会导致海洋生物包括鱼类的组织及体液酸中毒,从而影响动物的生理行为<sup>[48-49]</sup>。受CO<sub>2</sub>分压升高对生物代谢、生长和繁殖的长期影响,生物体的pH值、重碳酸盐及CO<sub>2</sub>水平将会改变,而且所有这些改变对生物种群及物种水平上的影响均相当不利<sup>[50]</sup>。CO<sub>2</sub>分压升高对鱼类的酸碱状态、呼吸作用、血液循环及神经系统功能的短期影响,以及对生长速率和繁殖的长期影响已有报道<sup>[50-51]</sup>。所有实验都表明酸化海水对鱼类的整个生活史(卵、幼苗、幼体、成体)有不利的负面影响<sup>[52-53]</sup>。

目前,总体来说,就海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响的研究还处于起步阶段,实验方法和测量技术都不完善;大尺度实验开展的较少;关于海洋酸化影响珊瑚礁和珊瑚礁生物的各种生理过程和机制,所了解的还很少<sup>[54-55]</sup>;所形成的理论尚不完善<sup>[8]</sup>。一些关键的过程和机制都停留在假说阶段,缺乏有力的实验证明。例如珊瑚共生体中光合与钙化的关系,到目前为止仍不清楚,而二者之间的关系是很多其它结论的基础。因此,需要就各种作用机制和过程进行更深入的研究。另外,很多模拟实验所控制的条件与自然条件不一样,实验结果不能准确地反映真实情况。健康的珊瑚礁海域的水体P(CO<sub>2</sub>)存在着巨大的日变化<sup>[56-57]</sup>。而目前的大多数实验是将pH值(或P(CO<sub>2</sub>))固定在一定水平进行实验,这本身和自然条件下P(CO<sub>2</sub>)处于波动状态的情况不相一致,而且当P(CO<sub>2</sub>)较高时,系统会通过自身调节增加光合作用(尤其在营养盐非限制区),可以在一定程度上缓解区域内P(CO<sub>2</sub>)升高的效应。所以,实验方法等方面还需进一步的改善。

## 3 海洋酸化与其它关键因子对珊瑚礁生态系统的协同作用

伴随着海洋酸化,海水升温、海平面上升、营养盐加富、陆源输入物增加等这些由于全球变化和人类活动而导致的环境改变也同时作用于珊瑚礁生态系统,就目前的研究现状而言,其单一效应和联合效应尚无法明确区分,难以单独量化海洋酸化对全球珊瑚礁退化的影响。就实际运用而言,研究海洋酸化与这些改变的环境因子对珊瑚礁生态系统的协同作用更能准确地预测珊瑚礁未来的命运,目前就海洋酸化与其它环境因子对珊瑚礁生态系统的协同作用的研究较少,主要集中在光照、温度和营养盐方面。

### 3.1 海洋酸化与光照因子的协同作用

光照是维持造礁石珊瑚钙化生长所必须的因子。在适当光照条件下,虫黄藻进行光合作用,为造礁石珊

瑚的钙化生长提供重要的能量来源<sup>[31]</sup>。Gattuso<sup>[58]</sup>总结以往大量的实验结果表明,造礁石珊瑚在光照条件下的钙化率是在黑暗条件下的3倍。Schneider<sup>[25]</sup>等人的实验表明,在无光照条件下,造礁石珊瑚更容易出现净溶解现象。因此,在海洋酸化和光照衰减的共同胁迫下,造礁石珊瑚更可能出现负增长。

近年来,由于受全球变化和人类活动的影响,全球很多珊瑚礁区的水体透明度降低,尤其是在受人类活动影响较多的沿岸河口海域,导致到达珊瑚礁表面的光照强度降低。因此,研究光照与海洋酸化对珊瑚礁的协同作用具有现实的生态学意义,而目前的相关研究还处于起步阶段。

### 3.2 海洋酸化与温度因子的协同作用

全球变暖导致全球海洋表层水体升温<sup>[27]</sup>。过去50a里在热带亚热带海域的升温过程使得海水温度已经接近造礁石珊瑚的耐热极限<sup>[59]</sup>。海水升温对造礁石珊瑚的生理会产生重大影响,表现在生产率、生长率、钙化率和白化等方面。当海洋酸化和海水升温协同作用时,造礁石珊瑚会在更低的温度发生白化<sup>[32]</sup>。海洋酸化和海水升温都会显著降低珊瑚礁鱼类的有氧代谢能力,而在二者的协同作用下,珊瑚礁鱼类将可能受到更大的胁迫<sup>[60]</sup>,这种联合效应对珊瑚礁区的无脊椎动物(海蛇尾)的生存可以构成致命的威胁<sup>[61]</sup>。Hoegh-Guldberg<sup>[31]</sup>等人认为,在不久的将来,随着海洋酸化的加剧和海水温度的升高,全球范围内的珊瑚礁生态系统将会出现更频繁、更严重的珊瑚白化、疾病以及死亡事件,珊瑚礁及其它底栖生物的群落结构和生物多样性将受到严重影响<sup>[62]</sup>。

### 3.3 海洋酸化与富营养化的协同作用

营养盐加富和海水酸化对造礁石珊瑚的胁迫实验表明,单一的营养盐加富或海水酸化胁迫后,造礁石珊瑚生长效率的恢复明显比二者联合胁迫后的要好<sup>[63]</sup>。如果该实验结果与自然环境下的造礁石珊瑚的响应一致,那么沿岸河口珊瑚礁区不断加剧的富营养化将与海洋酸化一起对造礁石珊瑚的造礁能力和生存能力产生严重负面影响。

在自然条件下,珊瑚礁生态系统由于同时受到如此众多复杂因子(如海洋酸化、温度、光照、富营养化等)的共同影响,导致海洋酸化的效应容易被其它因素的影响所遮蔽而被忽视。所以到目前为止,在野外很难探查海水酸化影响珊瑚礁生态系统的直接的现场证据。这也是导致异议存在的一个根本原因。解决这个问题,不仅需要了解饱和度、光照、温度和营养盐等单个因子对珊瑚礁的效应,更需要联合多因子开展实验,探索并区分多因子的联合效应和协同作用,而目前这些方面的研究都很欠缺。

## 4 海洋酸化可能导致珊瑚礁生态系统群落结构的改变和系统的退化

这方面的工作比较复杂而且需要长期积累,目前相关数据与证据尚不充分,研究多停留在理论推测上。鉴于珊瑚礁生物对海洋酸化的胁迫具有较大的种间差异性,随着海洋酸化的加剧,珊瑚礁群落结构无疑将发生相应的变化,珊瑚礁群落结构更可能朝着种类单一、结构简单、生产力低下的方向变化<sup>[54,64]</sup>。根据以往的观测研究和IPCC报告的预测结果<sup>[7-8,26-27]</sup>,珊瑚礁生态系统在不久的将来将面临着严重的威胁(图2)。

另外,只有当钙化率大于溶解率时,珊瑚礁体才能正常增长,反之,珊瑚礁体将出现溶解。而目前在全球变化的背景下,世界范围内的珊瑚礁都出现了退化趋势,钙化能力下降,而溶解速率上升。随着海洋酸化的不断加剧,珊瑚礁出现净溶解现象只是时间问题。由此将产生严重的生态后果:(1)珊瑚礁的增长赶不上海平面的上升,导致珊瑚礁被“淹死”;(2)不能为其它生物创造生存空间,导致某些生物种群的丧失<sup>[6]</sup>。所以海洋酸化将加剧珊瑚礁系统的退化。

虽然珊瑚礁生态系统内的生物大多经过了至少几百万年的进化,具有一定的抵御环境扰动的能力,然而,近年来全球范围内珊瑚礁的迅速退化和死亡表明,近期环境因子波动的强度和频度已经远远超过了珊瑚礁生物的承受范围<sup>[64]</sup>。目前出现的海洋酸化程度将是珊瑚礁无法适应的,随着海洋酸化的加剧,珊瑚礁系统的健康和功能必然持续退化。

综上所述,多因素综合效应使得造礁石珊瑚群落的恢复更困难,若不善加保育,珊瑚礁生态系统将变得支离破碎并走向衰亡<sup>[65]</sup>。目前大多数的模拟实验都是在短期的个体水平上的,缺乏长期的群落及系统水平上



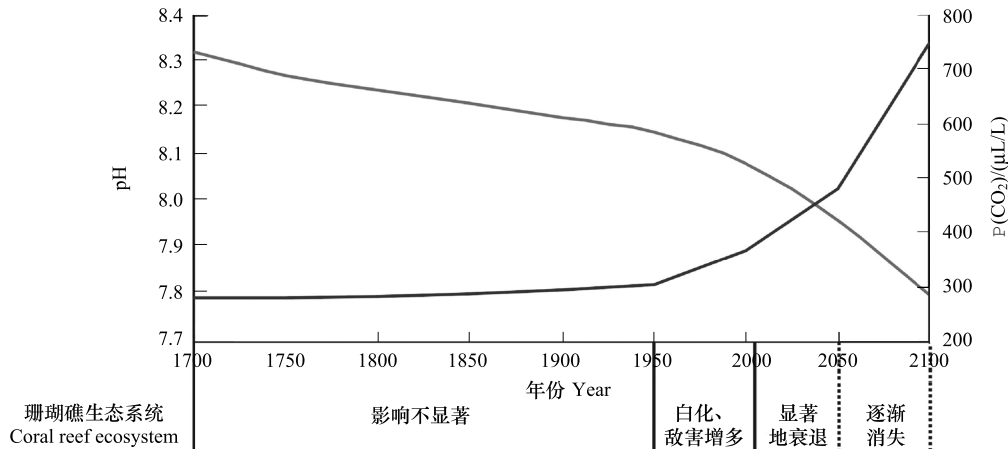


图2 珊瑚礁生态系统未来可能的变化趋势

Fig. 2 Probable changes of the coral reef ecosystems in the near future

的实验,所以要想使整个理论体系更有说服力,实验方法的改进是需要的,并且还要在时间上、空间上及系统层面上扩大实验尺度。

## 5 研究展望

我国具有相当丰富的珊瑚礁资源,但对珊瑚礁生态系统的相关研究较少,较缺乏长期的现场监测和实验生物学方面的证据。Gao<sup>[66-67]</sup>等人通过实验认为,海洋酸化和紫外线辐照都会对珊瑚藻和浮游钙化藻类的钙化生长产生抑制作用,当二者同时作用于这些实验对象时,还会表现出明显的协同作用。另外,Wu<sup>[68]</sup>等人研究表明,海洋酸化能促进浮游植物的光合作用。来自珊瑚骨骼记录的信息显示,南中国海海水碳酸盐体系与全球海洋酸化的趋势一致,受海洋酸化等影响,中国南海造礁石珊瑚钙化率近几十年来一直呈现出下降趋势<sup>[69]</sup>。张远辉<sup>[70]</sup>等观测了南沙海域珊瑚礁区海水碳酸盐体系,并据此预测到2100年,该海域的珊瑚礁将停止生长。这些研究为人们理解和进一步研究海洋酸化对南海海域珊瑚礁生态系统的影响奠定了一定的基础。

在海洋酸化和全球变化作用下,珊瑚礁的命运不容乐观,结合我国研究现状有必要从如下几个方面加强研究:

### (1) 对珊瑚礁区海水碳酸盐体系进行长期系统的监测

目前仅在我国海域的个别珊瑚礁区有零星的海水碳酸盐体系的观测研究,不利于探讨和归纳我国珊瑚礁区海水碳酸盐体系的变动特征、影响因素、生物活动和受海洋酸化影响的现状等,因此需要在时间和空间尺度上有所加强。另外,我国的珊瑚礁资源(如西沙群岛珊瑚礁和三亚珊瑚礁)近年来呈现出显著的退化趋势,迫切需要在此类珊瑚礁区开展系统监测,以探讨其退化原因和机制。

珊瑚礁区(尤其是近岸河口区)海水碳酸盐体系受诸多复杂因素的影响,在探讨其变动特征和影响因素时,需要结合水质环境、生物群落(浮游生物和底栖生物群落)分布状况、水交换量、水体来源、上升流等调查数据进行系统分析。因此,完成这样的研究工作需要多学科密切交叉进行。

### (2) 开展实验室和原位海洋酸化胁迫实验

纵观国际上的相关研究,目前主要集中在海洋酸化对造礁石珊瑚钙化率的影响方面,缺乏长期胁迫实验验证,有必要开展海洋酸化对造礁石珊瑚其它生理过程或珊瑚礁其它生物活动的影响的研究。例如,探讨海洋酸化胁迫下,珊瑚礁生物体内脂肪含量和蛋白酶含量等生化指标的变化,以验证海洋酸化的胁迫效应;利用分子生物学手段探讨海洋酸化胁迫下,相关基因片段的表达,从生物学角度检验海洋酸化对实验对象的胁迫作用。同时,可以从个体、种群、群落和系统层面进行实验研究,探索不同种类对酸化响应的共同性与特异性,以期更全面认识珊瑚礁生态系统的响应。

与室内模拟实验相比较,原位围隔实验与自然生态更加接近,更能反映实际可能的影响结果和变化趋势。

目前国际上已经有些初步的探索,但仍缺乏系统的、长期的胁迫研究。因此,为了探讨海洋酸化胁迫下的珊瑚礁生态系统的未来走向,原位围隔实验将是一种更可靠的实验方法,缺点是成本较高。

另外,由于珊瑚礁生态系统(尤其是沿岸河口区的珊瑚礁)受到诸多复杂因素的影响,探讨海洋酸化对这些珊瑚礁系统的影响,需要结合其它环境因子,开展多因子联合实验,以探讨海洋酸化与其它因子的协同作用,并进一步明确海洋酸化在全球珊瑚礁退化过程中的作用。

通过以上几个方面的研究分析,可以更加深入地认识海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响,以便于预测珊瑚礁生态系统未来变化趋势,从而为制定保护和利用珊瑚礁生态资源策略提供参考。

#### References:

- [ 1 ] Royer D L, Berner R A, Montanez I P, Tabor N J, Beerling D J. CO<sub>2</sub> as a primary driver of Phanerozoic climate. *GSA Today*, 2004, 14(3): 4-10.
- [ 2 ] Crowley T J, Berner R A. CO<sub>2</sub> and climate change. *Science*, 2001, 292(5518): 870-872.
- [ 3 ] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, Barkov N I, Barnola J M, Basile I, Bender M, Chappellaz J, Davis M, Delaygue G, Delmotte M, Kotlyakov V M, Legrand M, Lipenkov V Y, Lorius C, Pépin L, Ritz C, Saltzman E, Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, 399(6735): 429-436.
- [ 4 ] Augustin L, Barbante C, Barnes P R F, Barnola J M, Bigler M, Castellano E, Cattani O, Chappellaz J, Dahl-Jensen D, Delmonte B, Dreyfus G, Durand G, Falourd S, Fischer H, Flückiger J, Hansson M E, Huybrechts P, Jügler G, Johnsen S J, Jean Jouze J, Kaufmann P, Kipfstuh J, Lambert F, Lipenkov V Y, Littot G C, Longinelli A, Lorrain R, Maggi V, Masson-Delmotte V, Miller H, Mulvaney R, Oerlemans J, Oerter H, Orombelli G, Parrenin F, Peel D A, Petit J R, Raynaud D, Ritz C, Ruth U, Schwander J, Siegenthaler U, Souchez R, Stauffer B, Steffensen J P, Stenni B, Stocker T F, Tabacco I E, Udisti R, van de Wal R S W, van den Broeke M, Weiss J, Wilhelms F, Winther J G, Wolff E W, Zucchelli M. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 2004, 429(6992): 623-628.
- [ 5 ] Siegenthaler U, Stocker T F, Monnin E, Lüthi D, Schwander J, Stauffer B, Raynaud D, Barnola J M, Fischer H, Masson-Delmotte V, Jouze J. Stable carbon cycle climate relationship during the late Pleistocene. *Science*, 2005, 310(5752): 1313-1317.
- [ 6 ] NOAA. Monthly mean atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, Hawaii. [2011-06-01] <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [ 7 ] Kleypas J A, Langdon C. Overview of CO<sub>2</sub>-induced changes in seawater chemistry. Indonesia: Proceedings 9th International Coral Reef Symposium, 2000, 2: 1085-1089.
- [ 8 ] Kleypas J A, Feely R A, Fabry V J, Langdon C, Sabine C L, Robbins L L. Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research. St. Petersburg: Sponsored by NSF, NOAA, and the US Geological Survey, 2005: 88-88.
- [ 9 ] Buesseler K O. Ocean biogeochemistry and the global carbon cycle: an introduction to the U. S. joint global ocean flux study. *Oceanography*, 2001, 14(4).
- [ 10 ] Invers O, Tomas F, Pérez M, Romero J. Potential effect of increased global CO<sub>2</sub> availability on the depth distribution of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile: a tentative assessment using a carbon balance model. *Bulletin of Marine Science*, 2002, 71(3): 1191-1198.
- [ 11 ] Goiran C, Al-Moghrabi S, Allemand D, Jaubert J. Inorganic carbon uptake for photosynthesis by the symbiotic coral/dinoflagellate association. I. Photosynthetic performances of symbionts and dependence on sea water bicarbonate. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1996, 199(2): 207-225.
- [ 12 ] Gruber N, Keeling C D, Bates N R. Interannual variability in the North Atlantic Ocean carbon sink. *Science*, 2002, 298(5602): 2374-2378.
- [ 13 ] González-Dávila M, Santana-Casiano J M, Rueda M J, Llinás O, González-Dávila E F. Seasonal and interannual variability of sea-surface carbon dioxide species at the European Station for Time Series in the Ocean at the Canary Islands (ESTOC) between 1996 and 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(3): 1076-1089.
- [ 14 ] Brix H, Gruber N, Keeling C D. Interannual variability of the upper ocean carbon cycle at station ALOHA near Hawaii. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18: GB4019, doi: 10.1029/2004GB002245.
- [ 15 ] Zimmerman R C, Kohrs D G, Steller D L, Alberte R S. Impacts of CO<sub>2</sub> enrichment on productivity and light requirements of eelgrass. *Plant Physiology*, 1997, 115(2): 599-607.
- [ 16 ] Langdon C, Broecker W, Hammond D, Glenn E, Fitzsimmons K, Nelson S G, Peng T S, Hadjas I, Bonani G. Effect of elevated CO<sub>2</sub> on the community metabolism of an experimental coral reef. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(1): 11.1-11.14.
- [ 17 ] Leclercq N I C, Gattuso J E A N P, Jaubert J E A N. CO<sub>2</sub> partial pressure controls the calcification rate of a coral community. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 329-334.
- [ 18 ] Leclercq N, Gattuso J P, Jaubert J. Primary production, respiration, and calcification of a coral reef mesocosm under increased CO<sub>2</sub> partial pressure. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(2): 558-564.
- [ 19 ] Marubini F, Atkinson M J. Effects of lowered pH and elevated nitrate on coral calcification. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 188(5):

- 117-121.
- [20] Gattuso J P, Frankignoulle M, Bourge I, Romaine S, Buddemeier R W. Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. *Global and Planetary Change*, 1998, 18(1/2): 37-46.
- [21] Langdon C, Takahashi T, Sweeney C, Chipman D, Goddard J, Marubini F, Aceves H, Barnett H, Atkinson M J. Effect of calcium carbonate saturation state on the calcification rate of an experimental coral reef. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(2): 639-654.
- [22] Marubini F, Barnett H, Langdon C, Atkinson M J. Dependence of calcification on light and carbonate ion concentration for the hermatypic coral *Porites compressa*. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 220: 153-162.
- [23] Marubini F, Ferrier-Pagés C, Cuif J P. Suppression of skeletal growth in scleractinian corals by decreasing ambient carbonate-ion concentration: a cross-family comparison. *Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 2003, 270(1511): 179-184.
- [24] Millero F J. *Chemical Oceanography*. 3rd ed. Marine Science Series. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [25] Schneider K, Erez J. The effect of carbonate chemistry on calcification and photosynthesis in the hermatypic coral *Acropora eurystoma*. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(3): 1284-1293.
- [26] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2001.
- [27] Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007.
- [28] Burris J E, Porter J W, Laing W A. Effects of carbon dioxide concentration on coral photosynthesis. *Marine Biology*, 1983, 75(2/3): 113-116.
- [29] Langdon C. Review of experimental evidence for effects of CO<sub>2</sub> on calcification of reef-builders // *Proceedings 9th International Coral Reef Symposium*. 2002: 1091-1098.
- [30] Muscatine L. The role of symbiotic algae in carbon and energy flux in reef corals // Dubinsky Z, ed. *Coral Reefs: Ecosystems of the World 25*. Amsterdam: Elsevier, 1990: 75-87.
- [31] Hoegh-Guldberg O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research*, 1999, 50(8): 839-866.
- [32] Anthony K R N, Kline D I, Diaz-Pulido G, Dove S, Hoegh-Guldberg O. Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 105(45): 17442-17446.
- [33] Heyward A J, Negri A P. Natural inducers for coral larval metamorphosis. *Coral Reefs*, 1999, 18(3): 273-279.
- [34] Birrell C L, McCook L J, Willis B L, Harrington L. Chemical effects of macroalgae on larval settlement of the broadcast spawning coral *Acropora millepora*. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 362: 129-137.
- [35] Kuffner I B, Andersson A J, Jokiel P L, Rodgers K S, Mackenzie F T. Decreased abundance of crustose coralline algae due to ocean acidification. *Nature Geoscience*, 2008, 1(2): 114-117.
- [36] Maoz F, Tchernov D. Scleractinian coral species survive and recover from decalcification. *Science*, 2007, 315(5820): 1811-1811.
- [37] Suzuki A, Nakamori T, Kayanne H. The mechanism of production enhancement in coral reef carbonate systems: model and empirical results. *Sedimentary Geology*, 1995, 99(3/4): 259-280.
- [38] Gattuso J P, Payri C E, Pichon M, Delesalle B, Frankignoulle M. Primary production, calcification, and air-sea CO<sub>2</sub> fluxes of macroalgal-dominated coral reef community (Moorea, French Polynesia). *Journal of Phycology*, 1997, 33(5): 729-738.
- [39] Walter L M, Burton E A. Dissolution of recent platform carbonate sediments in marine pore fluids. *American Journal of Science*, 1990, 290: 601-643.
- [40] Silverman J, Lazar B, Cao L, Caldeira K, Erez J. Coral reefs may start dissolving when atmospheric CO<sub>2</sub> doubles. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(5): 1-5.
- [41] Littler M M, Littler D S. Models of tropical reef biogenesis: the contribution of algae // Round F E, Chapman D J, eds. *Progress in Phycological Research*. Bristol: Biopress, 1984, 3: 323-364.
- [42] Chisholm J R M. Calcification by crustose coralline algae on the northern Great Barrier Reef, Australia. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(7): 1476-1484.
- [43] Diaz-Pulido G, McCook L J, Larkum A W D, Lotze H K, Raven J A, Schaffelke B, Smith J & Steneck R S. Vulnerability of macroalgae of the Great Barrier Reef to climate change // Johnson J, Marshall P, eds. *Climate change and the Great Barrier Reef*. Great Barrier Reef Marine Park Authority & The Australian Greenhouse Office. 2007, 151-192.
- [44] Gazeau F, Quiblier C, Jansen J M, Gattuso J P, Middelburg J J, Heip C H R. Impact of elevated CO<sub>2</sub> on shellfish calcification. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L07603, doi:10.1029/2006GL028554.
- [45] Kurihara H. Effects of CO<sub>2</sub>-driven ocean acidification on the early developmental stages of invertebrates. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 373: 275-284.
- [46] Green M A, Jones M E, Boudreau C L, Moore R L, Westman B A. Dissolution mortality of juvenile bivalves in coastal marine deposits. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(3): 727-734.
- [47] Kurihara H, Shirayama Y. Effects of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on sea urchin early development. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, 274: 161-196.

- [48] Roos A, Boron W F. Intracellular pH. *Physiological Reviews*, 1981, 61(2): 296-434.
- [49] Pörtner H O, Langenbuch M, Reipschläger A. Biological impact of elevated ocean CO<sub>2</sub> concentrations: lessons from animal physiology and earth history. *Journal of Oceanography*, 2004, 60(4): 705-718.
- [50] Ishimatsu A, Kita J. Effects of environmental hypercapnia on fish. *Japanese Journal of Ichthyology*, 1999, 46(1): 1-13.
- [51] Ishimatsu A, Hayashi M, Kikkawa T. Fishes in high CO<sub>2</sub>, acidified oceans. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 373: 295-302.
- [52] Ishimatsu A, Kikkawa T, Hayashi M, Lee K S, Kita J. Effects of CO<sub>2</sub> on marine fish: larvae and adults. *Journal of Oceanography*, 2004, 60(4): 731-741.
- [53] Kikkawa T, Ishimatsu A, Kita J. Acute CO<sub>2</sub> tolerance during the early developmental stages of four marine teleosts. *Environmental Toxicology*, 2003, 18(6): 375-382.
- [54] Buddemeier R W, Kleypas J A, Aronson R. Coral Reefs and Global Climate Change. Potential Contributions of Climate Change to Stresses on Coral Reef Ecosystems. Arlington: Pew Center for Global Climate Change, 2004.
- [55] Denman K E, Hoffman E, Marchant H. Marine biotic responses to environmental change and feedbacks to climate. New York: Cambridge University Press, 1996: 483-516.
- [56] Dai M H, Lu Z M, Zhai W D, Chen B S, Cao Z M, Zhou K B, Cai W J, Chen C T A. Diurnal variations of surface seawater pCO<sub>2</sub> in contrasting coastal environments. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(3): 735-745.
- [57] Kayanne H, Suzuki A, Saito H. Diurnal changes in the partial pressure of carbon dioxide in coral reef water. *Science*, 1995, 269(5221): 214-216.
- [58] Gattuso J P, Allemand D, Frankignoulle M. Photosynthesis and calcification at cellular, organismal and community levels in coral reefs: a review on interactions and control by carbonate chemistry. *American Zoologist*, 1999, 39(1): 160-183.
- [59] Hughes T P, Baird A H, Bellwood D R, Card M, Connolly S R, Folke C, Grosberg R, Hoegh-Guldberg O, Jackson J B C, Kleypas J, Lough J M, Marshall P, Nyström M, Palumbi S R, Pandolfi J M, Rosen B, Roughgarden J. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 2003, 301(5635): 929-933.
- [60] Munday P L, Crawley N E, Nilsson G E. Interacting effects of elevated temperature and ocean acidification on the aerobic performance of coral reef fishes. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 388: 235-242.
- [61] Wood H L, Spicer J I, Lowe D M, Widdicombe S. Interaction of ocean acidification and temperature; the high cost of survival in the brittlestar *Ophiura ophiura*. *Marine Biology*, 2010, 157(9): 2001-2013.
- [62] Hale R, Calosi P, McNeill L, Mieszkowska N, Widdicombe S. Predicted levels of future ocean acidification and temperature rise could alter community structure and biodiversity in marine benthic communities. *Oikos*, 2011, 120(5): 661-674.
- [63] Renegar D A, Riegl B M. Effect of nutrient enrichment and elevated CO<sub>2</sub> partial pressure on growth rate of Atlantic scleractinian coral *Acropora cervicornis*. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 293: 69-76.
- [64] Loya Y, Sakai K, Yamazato K, Nakano Y, Sambali H, van Woesik R. Coral bleaching: the winners and the losers. *Ecology Letters*, 2001, 4(2): 122-131.
- [65] Mumby P J, Hastings A, Edwards H J. Thresholds and the resilience of Caribbean coral reefs. *Nature*, 2007, 450(7166): 98-101.
- [66] Gao K S, Zheng Y Q. Combined effects of ocean acidification and solar UV radiation on photosynthesis, growth, pigmentation and calcification of the coralline alga *Corallina sessilis* (Rhodophyta). *Global Change Biology*, 2010, 16(8): 2388-2398.
- [67] Gao K S, Ruan Z X, Villafane V E, Villafañe V E, Gattuso J P, Helbling E W. Ocean acidification exacerbates the effect of UV radiation on the calcifying phytoplankter *Emiliania huxleyi*. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6): 1855-1862.
- [68] Wu Y P, Gao K S. Combined effects of solar UV radiation and CO<sub>2</sub>-induced seawater acidification on photosynthetic carbon fixation of phytoplankton assemblages in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(32): 3680-3686.
- [69] Wang X, Wang D X, Gao R Z, Sun D H. Anthropogenic climate change revealed by coral gray values in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(13): 1304-1310.
- [70] Zhang Y H, Chen L Q. Response of coral reef in Nansha waters to increasing atmospheric CO<sub>2</sub>. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2006, 25(1): 68-76.

#### 参考文献:

- [70] 张远辉, 陈立奇. 南沙珊瑚礁对大气 CO<sub>2</sub> 含量上升的响应. 台湾海峡, 2006, 25(1): 68-76.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 5 March, 2012 (Semimonthly)

## CONTENTS

- Statistical characteristics of eutrophication process in Dianshan Lake ..... CHENG Xi, LI Xiaoping, CHEN Xiaohua (1355)
- Cadmium assimilation and elimination and biological response in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) fed on Cadmium diets ..... ZHANG Zhengtian, ZHANG Guangduo, ZHANG Hucheng, et al (1363)
- Effect of co-cultivation time on camptothecin content in *Camptotheca acuminata* seedlings after inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi ..... YU Yang, YU Tao, WANG Yang, et al (1370)
- Relationship between frequency of sandstorms and air humidity as well as plant phenology: a case study from the Minqin desert area ..... CHANG Zhaofeng, WANG Yaolin, HAN Fugui, et al (1378)
- Genetic diversity and evolution relationship on mtDNA D-loop in Tibetan yaks ..... ZHANG Chengfu, XU Lijuan, JI Qiumei, et al (1387)
- Geostatistical analysis on spatiotemporal distribution pattern of soil water content of forest gap in *Pinus koraiensis* dominated broadleaved mixed forest ..... LI Meng, DUAN Wenbiao, CHEN Lixin, et al (1396)
- Soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in Ziwuling mountain in the Loess Plateau, China ..... XING Xiaoyi, HUANG Yimei, HUANG Haibo, et al (1403)
- Soil carbon, nitrogen and microbiological characteristics during bamboo high-speed growth ..... WANG Xueqin, ZHANG Qichun, YAO Huaiying (1412)
- Effects of long-term increased soil N on leaf traits of several species in typical Inner Mongolian grassland ..... HUANG Juying, YU Hailong, YUAN Zhiyou, et al (1419)
- Influence of arbuscular mycorrhizal associations on the interspecific competition between mycorrhizal and non-mycorrhizal plants ..... ZHANG Yuting, WANG Wenhua, SHEN Hong, et al (1428)
- Structure and biodiversity of fig wasp community inside syconia of *Ficus virens* Ait. var. *sublanceolata* (Miq.) Corner in Fuzhou ..... WU Wenshan, CHEN Youling, CAI Meiman, et al (1436)
- Growth and photosynthetic characteristics of *Epimedium koreanum* Nakai in different habitats ..... ZHANG Yonggang, HAN Mei, HAN Zhongming, et al (1442)
- The critical temperature to Huashan Pine (*Pinus armandi*) radial growth based on the daily mean temperature ..... FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (1450)
- The analysis of grade diversity indices of butterfly community in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River ..... MA Qi, LI Aimin, DENG Heli (1458)
- Research on dynamic characteristics of photosynthesis in muskmelon seedling leaves ..... HAN Ruifeng, LI Jianming, HU Xiaohui, et al (1471)
- Effects of different winter covering crops cultivation on methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission fluxes from double-cropping paddy field ..... TANG Haiming, XIAO Xiaoping, SHUAI Xiqiang, et al (1481)
- Variations in groundwater levels and quality and their effects on vegetation in the western Grubantonggut Desert ..... ZENG Xiaoling, LIU Tong, ZHANG Weibin, et al (1490)
- Carbon and nitrogen stable isotope characteristics of particulate organic matter and zooplankton in Liuxihe Reservoir ..... NING Jiajia, LIU Hui, GU Binhe, et al (1502)
- Selection of vegetable seeds native in China instead of the cress seed for evaluating the maturity of biosolids ..... LIU Songsong, XU Tianfen, WU Qitang, et al (1510)
- Effects of anthropogenic nutrient input on organisms from different trophic levels in Hanfeng Lake: evidence from stable carbon and nitrogen isotope analysis ..... LI Bin, WANG Zhijian, JIN Li, et al (1519)
- Temporal and spatial distribution of phytoplankton in Liusha Bay ..... ZHANG Caixue, CHEN Huiyan, SUN Xingli, et al (1527)
- Study on the supercooling of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) ..... ZHAO Benliang, ZHANG Jia'en, LUO Mingzhu, et al (1538)
- The effects of rice growth stages on the ovarian development and take-off of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* ..... CHEN Yu, FU Qiang, LAI Fengxiang, et al (1546)
- Cold tolerance of the overwintering egg of *Apolygus lucorum* Meyer-Dür (Hemiptera: Miridae) ..... ZHUO Degan, LI Zhaohui, MEN Xingyuan, et al (1553)
- A suggestion on the estimation method of population sizes of *Niviventer confucianus* in Land-bridge island ..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (1562)
- The carbon footprint of food consumption in Beijing ..... WU Yan, WANG Xiaoke, LU Fei (1570)
- Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hanshan County in Anhui Province ..... FU Yinyin, YUAN Zengwei, WU Huijun, et al (1578)
- A laboratory study of auctions for water rights transactions in inland river basin: a case study of irrigation areas of Heihe river basin ..... DENG Xiaohong, XU Zhongmin (1587)
- Review and Monograph**
- A review of the effect of typhoon on forests ..... LIU Bin, PAN Lan, XUE Li (1596)
- Research progress on the effects of ocean acidification on coral reef ecosystems ..... ZHANG Chenglong, HUANG Hui, HUANG Liangmin, et al (1606)
- Interspecific competition among three invasive *Liriomyza* species ..... XIANG Juncheng, LEI Zhongren, WANG Haihong, et al (1616)
- Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters ..... YU Yu, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (1623)
- Recent advances in studies on dissimilatory Fe(III)-reducing microorganisms ..... LI Huijuan, PENG Jingjing (1633)
- Discussion**
- Ecological vulnerability research for Xilingol League, Northern China ..... XU Guangcai, KANG Muye, Marc Metzger, et al (1643)
- Scientific Note**
- Spatial distribution and species composition of zooplanktons in the eastern tropical Pacific Ocean off Costa Rica ..... LIU Bilin, CHEN Xinjun, JIA Tao, et al (1654)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 5 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 5 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元