

学校编码: 10384

学号: 22620071152382

UDC ___

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

颗石藻 *Emiliana huxleyi* 光合、呼吸及钙化
作用对海洋酸化的响应初探

Responses of photosynthesis, respiration and calcification of
the coccolithophorid *Emiliana huxleyi* to ocean acidification
-a preliminary study

杨 艳

指导教师姓名: 戴民汉 教授

专 业 名 称: 环 境 科 学

论文提交日期: 2010 年 月

论文答辩时间: 2010 年 月

学位授予日期: 2010 年 月

2010 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目 录

摘要	IX
缩略语表	XV
第一章 绪论	1
1.1 海洋酸化研究概况	2
1.1.1 大气中 CO ₂ 浓度增加对海水化学性质的影响	2
1.1.2 海洋酸化对颗石藻的影响	4
1.1.2.1 海洋酸化的研究方法	4
1.1.2.2 颗石藻的钙化作用及其对海洋酸化的响应	6
1.1.2.3 颗石藻的光合作用及其对海洋酸化的响应	8
1.1.2.4 海洋酸化对碳循环的影响	11
1.1.3 东海研究海洋酸化的展望	12
1.2 研究内容和目标	13
第二章 实验材料与方法	14
2.1 实验材料	14
2.2 实验方法	14
2.2.1 批次培养	14
2.2.1.1 pCO ₂ 控制系统	15
2.2.1.2 培养条件	15
2.2.1.3 碳酸盐系统参数测定	16
2.2.1.4 细胞丰度的测定	17
2.2.1.5 营养盐的测定	17
2.2.1.6 PIC、POC 及 PN 的测定	17
2.2.1.7 钙离子的测定	18
2.2.1.8 细胞比生长速率	18
2.2.1.9 POC 生产速率	18
2.2.1.10 净钙化速率	18
2.2.2 半连续培养	19
2.2.2.1 细胞培养	19
2.2.2.2 净光合放氧速率以及呼吸耗氧速率的测定	20
2.2.2.3 总群落生产 (GCP)、净群落生产 (NCP) 以及暗群落呼吸 (DCR)	20
2.2.2.4 POC、PIC 生产速率	20

2.2.2.5 数据处理	21
2.2.3 东海群落呼吸速率的测定	21
2.2.3.1 研究区域概况	21
2.2.3.2 样品采集与分析	22
第三章 颗石藻代谢对 CO₂ 升高的响应	25
3.1 批次培养结果	25
3.1.1 碳酸盐系统的控制情况	25
3.1.2 细胞的生长	25
3.1.3 营养盐的吸收	26
3.1.4 不同 CO ₂ 浓度下 POC 的生产速率	27
3.1.5 不同 CO ₂ 浓度下颗石藻的钙化速率	29
3.1.5.1 根据 TA 计算的钙化速率	29
3.1.5.2 根据 Ca ²⁺ 计算的钙化速率	30
3.1.5.3 根据 PIC 计算的钙化速率	30
3.1.6 不同 CO ₂ 浓度下 C/N 比值	32
3.1.7 不同 CO ₂ 浓度下 PIC/POC 比值	32
3.1.8 实验的平行性	34
3.2 半连续培养结果	35
3.2.1 碳酸盐系统的控制情况	35
3.2.2 细胞的生长	35
3.2.3 升高的 CO ₂ 对光合及钙化作用的影响	37
3.2.4 不同 CO ₂ 浓度下 C/N 比值	37
3.2.5 不同 CO ₂ 浓度下光合放氧及呼吸耗氧速率	38
3.2.6 实验的重复性	39
3.3 讨论	39
3.3.1 实验方法上的比较	40
3.3.2 海洋酸化对颗石藻生长速率及光合作用的影响	41
3.3.3 海洋酸化对颗石藻钙化作用的影响	42
3.3.4 海洋酸化对颗石藻 PIC/POC 比值的影响	44
3.3.5 海洋酸化对颗石藻 C/N 比值的影响	45
3.3.6 海洋酸化对颗石藻呼吸速率的影响	45
3.4 本章小结	46
第四章 夏季东海群落呼吸速率	47
4.1 群落呼吸速率的分布特征及影响因素	47

4.1.1 水文状况·····	47
4.1.2 群落呼吸速率的表层分布·····	47
4.1.3 群落呼吸速率的垂直分布·····	50
4.1.4 群落呼吸速率与盐度、细菌丰度、叶绿素 a 的相关性·····	50
4.2 讨论·····	53
4.2.1 与其他研究的比较·····	53
4.2.2 浮游生物对群落呼吸的贡献·····	55
4.2.3 初级生产力与群落呼吸的比值·····	55
4.3 本章小结·····	56
第五章 结论·····	58
5.1 本论文总结·····	58
5.2 尚未解决的科学问题和工作展望·····	59
参考文献·····	60
附录·····	66
致谢·····	67

图目录

图 1	海洋生物泵示意图.....	2
图 2	$p\text{CO}_2$ 控制装置示意图.....	15
图 3	夏季东海海流.....	22
图 4	2009 年 8 月 973 航次相关站位.....	23
图 5	批次培养中细胞丰度及比生长速率随培养时间的变化.....	26
图 6	批次培养中硝酸盐及磷酸盐浓度随培养时间的变化.....	27
图 7	批次培养中颗粒有机碳(POC)随培养时间的变化.....	28
图 8	颗粒有机碳(POC)从第二天至第六天的变化及线性回归后的方程.....	28
图 9	批次培养中总碱度 TA 随培养时间的变化.....	29
图 10	批次培养中由总碱度 TA 变量计算所得钙化速率随培养时间的变化.....	30
图 11	批次培养中 Ca^{2+} 随培养时间的变化.....	31
图 12	批次培养中颗粒氮(PN)随培养时间的变化.....	33
图 13	批次培养中不同 pH 水平下颗石藻的 C/N 比值.....	33
图 14	不同 pH 水平下单位细胞颗粒有机碳(POC)生产速率及钙化速率.....	34
图 15	平行性实验中各组细胞浓度的变化.....	34
图 16	半连续培养实验中 pH 及 $p\text{CO}_2$ 随培养时间的变化.....	36
图 17	半连续培养实验中细胞丰度及比生长速率随培养时间的变化.....	36
图 18	半连续培养实验中单位细胞颗粒有机碳(POC)和颗粒无机碳(PIC)生产速率.....	37
图 19	东海温度(A)和盐度(B)表层分布.....	48
图 20	东海温度(A)和盐度(B)垂直分布.....	49
图 21	群落呼吸速率表层分布图.....	49
图 22	东海群落呼吸速率垂直分布图.....	51
图 23	表层(A), 中层与底层(B)群落呼吸速率与盐度的相关性.....	51
图 24	表层群落呼吸速率与叶绿素 a(A)及细菌丰度(B)的相关性; 中层与底层群落呼吸速率与叶绿素 a(C)及细菌丰度(D)的相关性.....	52

表目录

表 1	工业革命以来及未来热带表层海水碳酸盐体系.....	3
表 2	大气 $p\text{CO}_2$ 由现阶段水平升高两至三倍的水平下颗石藻钙化作用的响应.....	9
表 3	各组批次培养实验的总结.....	14
表 4	批次培养中不同 pH 水平下的碳酸盐系统.....	25
表 5	批次培养中不同 pH 水平下颗石藻的钙化速率.....	31
表 6	平行性实验中不同组各参数的比较.....	35
表 7	不同 pH 水平下颗石藻的 NCP、DCR、GCP.....	38
表 8	重复性实验不同 pH 水平下颗石藻的 NCP、DCR、GCP.....	39
表 9	批次培养中不同方法测得的最高钙化速率.....	43
表 10	各海区混合层群落呼吸速率.....	54
表 11	DH22、DH34、YZ14、PN04、DH04 站位的各参数.....	56

Contents

Abstract.....**XI**

Abrivation **XV**

Chapter 1 Introduction **1**

1.1 Ocean acidification.....**2**

 1.1.1 Effect of elevated CO₂ on the chemistry of ocean waters2

 1.1.2 The impact of ocean acidification on coccolithophorid4

 1.1.2.1 Methods of ocean acidification research.....4

 1.1.2.2 Responses of calcification of coccolithophorid to ocean acidification6

 1.1.2.3 Responses of photosynthesis of coccolithophorid to ocean acidification8

 1.1.2.4 The impact of ocean acidification on carbon cycle.....11

 1.1.3 Progress of ocean acidification in the East China Sea12

1.2 Objective of this study **13**

Chapter 2 Material and Methods..... **14**

2.1 Material..... **14**

2.2 Methods..... **14**

 2.2.1 Batch culturing 14

 2.2.1.1 *p*CO₂ control system15

 2.2.1.2 Incubation condition.....15

 2.2.1.3 Carbonate system 16

 2.2.1.4 Cell density17

 2.2.1.5 Nutrients17

 2.2.1.6 PIC, POC and PN.....17

 2.2.1.7 Ca²⁺18

 2.2.1.8 Growth rate18

 2.2.1.9 POC production rate.....18

 2.2.1.10 Net calcification rate18

 2.2.2 Semi-continuous culturing.....19

 2.2.2.1 Culturing experiment19

 2.2.2.2 Net O₂ production rate and O₂ consumption rate20

 2.2.2.3 GCP, NCP and DCR.....20

 2.2.2.4 POC and PIC production rate20

 2.2.2.5 Statistical analysis21

2.2.3 Community respiration rate in the East China Sea	21
2.2.3.1 Study area	21
2.2.3.2 Sampling and analysis	22
Chapter 3 Responses of coccolithophorid to increasing CO₂	25
3.1 Results of batch culturing	25
3.1.1 Carbonate control system	25
3.1.2 Growth	25
3.1.3 Nutrient utilization	26
3.1.4 POC production rate at different CO ₂ levels	27
3.1.5 Calcification rate at different CO ₂ levels	29
3.1.5.1 Calcification rate calculated from TA budgeting	29
3.1.5.2 Calcification rate calculated from Ca ²⁺ budgeting	30
3.1.5.3 Calcification rate calculated from PIC budgeting	30
3.1.6 C/N ratio at different CO ₂ levels	32
3.1.7 PIC/POC ratio at different CO ₂ levels	32
3.1.8 Parallellity of experiment	34
3.2 Results of semi-continuous culturing	35
3.2.1 Carbonate control system	35
3.2.2 Growth	35
3.2.3 Effects of elevated CO ₂ on photosynthesis and calcification	37
3.2.4 C/N ratio at different CO ₂ levels	37
3.2.5 Net O ₂ production rate and O ₂ consumption rate at different CO ₂ levels	38
3.2.5 Repeatability of experiment	39
3.3 Discussion	39
3.3.1 Comparison of methods	40
3.3.2 Effects of ocean acidification on growth and photosynthesis	41
3.3.3 Effect of ocean acidification on calcification	42
3.3.4 Effect of ocean acidification on PIC/POC ratio	44
3.3.5 Effect of ocean acidification on C/N ratio	45
3.3.6 Effect of ocean acidification on respiration rate	45
3.4 Summary	46
Chapter 4 Community respiration rate in the East China Sea	
in summer	47
4.1 Distribution of community respiration rate and its influencing factors	47
4.1.1 Hydrography	47

4.1.2 Surface community respiration rate distribution	47
4.1.3 Vertical community respiration rate distribution	50
4.1.4 Correlations with salinity, bacterial abundance and chlorophyll a	50
4.2 Discussion	53
4.2.1 Comparison with other studies	53
4.2.2 Contributions of plankton groups to community respiration.....	55
4.2.3 Ratio of Primary Production to Community Respiration	55
4.3 Summary.....	56
Chapter 5 Summary	58
5.1 Conclusion	58
5.2 Prospect.....	59
Reference.....	60
Appendix	66
Acknowledgement.....	67

摘 要

工业革命以来,人类活动导致大气中二氧化碳浓度不断升高。海洋作为碳的一个重要储库吸收 CO_2 , 导致海水酸度增加、pH 值降低, 并引起碳酸钙饱和度不断降低, 这种现象被称为“海洋酸化”。颗石藻是海洋浮游钙化生物中的主要类群, 它通过光合、呼吸及钙化作用对海洋调节大气 CO_2 的两类生物泵过程均有贡献, 颗石藻的这些生物过程对海洋酸化的响应因而也成为研究大气 CO_2 升高对海洋碳循环影响的核心问题之一。本论文通过对 *Emiliana huxleyi* 颗石藻进行批次 (Batch culturing) 与半连续培养 (Semi-continuous culturing), 探讨了不同培养方式下大气 CO_2 浓度对 *E. huxleyi* 颗石藻的光合、呼吸及钙化作用的影响。本论文还研究了东海海区夏季的群落呼吸速率, 为研究海洋酸化对该海区碳循环特别是呼吸作用的影响提供背景知识。

在批次培养中, 我们向培养液中通入高浓度 CO_2 , 并通过 pH 控制器调控培养液的 pH 于 8.2、8.0 和 7.8, 用以模拟大气二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2$) 水平于 380、720、1100 ppm, 并研究了不同水平 CO_2 对 *E. huxleyi* 颗石藻细胞生长、颗粒有机碳 (POC) 生产速率、钙化速率、PIC/POC 比值的影响。实验结果表明, 未经过适应的颗石藻在高浓度 CO_2 下生长受到抑制, 相对于 pH=8.2, 单位细胞钙化速率分别下降 13.5%(pH=8.0)和 46%(pH=7.8), 而 PIC/POC 则分别降低了 11.1%和 38.9%; 但是, 单位细胞 POC 生产速率在不同 pH 条件下无明显差异; 通过对三种钙化速率测定方法的比较发现, 三种方法所得出的结果相近, 其中, 用总碱度变量计算的方法精度高于用 Ca^{2+} 和颗粒无机碳 (PIC)。

在半连续培养中, 通过植物生长气候箱调节空气中 CO_2 分压, 分别为 520 ppm 和 1100 ppm。经过充分适应后, 细胞生长速率不受 CO_2 分压影响, 但 POC 生产速率在高浓度 CO_2 下得到促进, 增幅为 20%, 不同 CO_2 分压条件下钙化速率差异不大, 在测定误差范围内。半连续培养中颗石藻的 C/N 比值高于 Redfield 比值且随 pH 的降低而升高。根据暗培养前后溶氧的变化计算得出的颗石藻呼吸速率在 pH 由 8.0 变为 7.8 时升高 38.6%。

以上表明, 不同培养方式下, 颗石藻生物过程对海洋酸化的响应差异明显。在批次培养中, $p\text{CO}_2$ 升高抑制细胞生长及钙化作用, 对光合作用的促进不显著;

在半连续培养中, $p\text{CO}_2$ 升高对细胞生长和钙化作用无影响, 光合作用及呼吸作用得到明显促进。这些差异说明在进行酸化研究时细胞对 pH 变化的适应情况对实验的结果影响很大。

通过对现场海水进行暗培养, 测定培养瓶中溶解氧变化的方法测定了夏季东海海区 22 个站位表、中、底层的群落呼吸速率。表层群落呼吸速率的变化范围是 $1.2\text{-}27.8 \mu\text{mol L}^{-1}\text{d}^{-1}$, 平均值为 $9.0 \mu\text{mol L}^{-1}\text{d}^{-1}$ 。表层高值区出现在长江口附近海域及浙江沿岸, 其值随离岸距离的增加而降低。群落呼吸速率的垂直分布特征受长江冲淡水影响显著。在受到长江冲淡水影响(盐度小于 32)的站位群落呼吸速率随深度的增加而降低, 在该区域以外(盐度大于 32), 群落呼吸速率随深度变化不明显。夏季东海群落呼吸的主要贡献者是细菌与浮游植物。表层海水中, 长江冲淡水区域群落呼吸速率与叶绿素 a 存在显著的相关性 ($R^2=0.66$), 浮游植物的呼吸作用对群落呼吸耗氧的贡献占 58.4%, 而不受长江冲淡水影响的区域细菌的贡献较大占 62.9%。真光层以下群落呼吸速率与细菌丰度相关性显著 ($R^2=0.53$), 细菌的呼吸作用是微生物耗氧的主要因素, 占群落呼吸的 89.3%。真光层中水柱积分的初级生产力与呼吸作用 (P/R) 的比值变化范围为 0.2-0.9, 平均值为 0.5, 表明东海夏季呈现出异养特征。呼吸速率消耗的有机碳除了由初级生产提供, 还可能由河流输入或者沉积物的再悬浮提供。

总之, *E. huxleyi* 颗石藻光合、呼吸及钙化作用对海洋酸化的响应, 随着细胞对 pH 变化的适应情况的不同而有所差异。东海群落呼吸作用是东海碳循环中的一个重要环节, 是研究海洋酸化对东海碳循环影响的重要因素。

关键词: 海洋酸化; *Emiliana huxleyi*; 钙化作用; 光合作用; 东海; 呼吸速率

Abstract

Atmospheric CO₂ concentration has been increasing due to antropogenic CO₂ emissions since the industrial revolution. Ocean as an important “sink” of atmospheric CO₂ has uptaken roughly 30% of the antropogenic CO₂. One of the consequences of the penetration of antropogenic CO₂ into the ocean is the increase in the acidity of the ocean, and the reduction in pH and the saturation state of calcium carbonate in the ocean. Such a phenomenon has been identified as “ocean acidification”. Coccolithophorid species *Emiliana huxleyi* is a major phytoplanktonic calcifier in the ocean, and the responses of photosynthesis and calcification of Coccolithophorid *Emiliana huxleyi* to ocean acidification have gained wide attention when researching the impact of elevated *p*CO₂ on ocean carbon cycling. Through batch and semi-continuous culturing of *Emiliana huxleyi*, we examined the impacts of *p*CO₂ on *Emiliana huxleyi* in different culturing methods. In addition, we investigated the community respiration rates in the East China Sea (ECS) in summer, in attempting to provide baselines for the future researches on response of carbon cycling through respiration to ocean acidification.

During the batch culturing, we simulated three levels of *p*CO₂ (380, 720 and 1100 ppm) using a pH controller to sustain 3 pH levels (8.2, 8.0 and 7.8) through bubbling high concentration CO₂ into the culture. We examined the effects of increased *p*CO₂ on the growth rate, POC production rate and calcification rate, as well as the PIC/POC ratio of *Emiliana huxleyi*. Without pre-adaption to pH changes, the growth of *Emiliana huxleyi* was inhibited at low pH. However, no significant changes were observed to the cellular POC production rates although the cellular calcification rates declined by 13.5% at pH=8.0 and 46% at pH=7.8 as compared to the control (pH=8.2). Consequently, PIC/POC ratios were also reduced by 11.1% and 38.9%. We found that using different methods in the calculation of calcification rates had similar results but using the approach of alkalinity budgeting had higher precision than Ca²⁺ and PIC budgeting.

During the semi-continuous culturing, CO₂ concentrations under 520 and 1100 ppm

were manipulated by using a plant growth chamber. After fully adapted to pH changes, CO₂ concentration had no impact on the growth of *Emiliana huxleyi*, while POC production rate increased at high *p*CO₂, the variation of calcification rate in different pH lever was within the measurement precision. As a result, PIC/POC ratio reduced by 11.5% from pH= 8.0 to pH=7.8. C/N ratios of *Emiliana huxleyi* under both pH levels were higher than Redfield ratio and decreased with increasing pH. The respiration rate, determined from in vitro changes in dissolve O₂ during dark incubation, was elevated by 38.6% when pH decreased from 8.0 to 7.8.

The responses of biological processes of *Emiliana huxleyi* were distinct under different incubation conditions. During the batch culturing, elevated *p*CO₂ inhibited their cell growth and calcification, but had no effects on photosynthesis. During the semi-continuous culturing, elevated *p*CO₂ had no impact on the cell growth and calcification, but significantly promoted photosynthesis. These discrepancies imply that adaption of cells to the pH change has an important effect on the results of acidification researches.

We investigated the community respiration rates in the ECS in summer by measuring the changes in dissolved O₂ in dark incubation. In the surface layer, community respiration rates changed from 1.2 to 27.8 μmol L⁻¹d⁻¹ and the average value was 9.0 μmol L⁻¹d⁻¹. At surface, the area of highest values was near to the mouth of the Changjiang Estuary and the nearshore region off Zhejiang. Community respiration rates generally decreased offshore. There were no obvious changes in community respiration rates vertically at stations not influenced by Changjiang plume (salinity>32). But at stations influenced by the Changjiang plume (salinity<32), community respiration rates decreased with depth. Community respirations were overall dominated by bacteria and phytoplankton. In the surface layer, community respiration rate was highly correlated with chlorophyll a ($R^2=0.66$) and phytoplankton contributed to 58.4% of the community O₂ consumption in the Changjiang plume area, while in the area not influenced by the Changjiang plume the contribution of bacterial respiration was 62.9%. Below euphotic zone, community respiration rate was correlated to the bacteria abundance ($R^2=0.53$) and the bacterial respiration

contributed to 89.3% of the community respiration. In euphotic zone, the ratio of integrated primary production to respiration (P/R) varied within 0.2-0.9 and the average value was 0.5, suggesting that the ECS was predominantly heterotrophic in summer. Organic carbon to fuel the heterotrophic respiration must be therefore added from the river plum or resuspended sediments.

In summary, when *Emiliana huxleyi* was in different conditions of adaptation to pH changes, its responses of photosynthesis and calcification to ocean acidification were distinct. Community respiration plays an important role in carbon cycle in the East China Sea and is an important factor when we research the impact of ocean acidification on carbon cycle in this area.

Keywords: ocean acidification; *Emiliana huxleyi*; calcification; photosynthesis; the East China Sea; community respiration rate

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库