

学校编码：10384

密级_____

学号：31120111151336

廈門大學

碩 士 學 位 論 文

海水酸化和低氧化对硅藻生理的影响

Physiological effects of seawater acidification and
deoxygenation on diatom

丁建成

指导教师姓名：高坤山 教授

专 业 名 称：海洋生物技术

论文提交日期：2014 年 05 月

论文答辩时间：2014 年 05 月

2014 年 5 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(高坤山教授)课题(组)的研究成果,获得(高坤山教授)课题(组)经费或实验室的资助,在(海洋环境生理学)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): 丁建成

2014年5月29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）：丁建成

2014 年 5 月 29 日

摘要	1
第 1 章 文献综述与研究意义	1
1.1 海洋酸化	1
1.1.1 海洋酸化对海水化学的影响	4
1.1.2 海洋酸化对藻类生理的影响	6
1.2 海水低氧	9
1.2.1 缺氧对海洋生物与生态的影响	15
1.3 研究方法	16
1.3.1 控制碳酸盐系统的方法和原理	16
1.3.2 控制海水中溶解氧的方法和原理	21
1.3.3 膜进样质谱仪在光合固碳相关过程研究中的应用	22
1.4 目的及方案	25
第 2 章 海洋酸化对浮游植物的影响	26
2.1 海洋酸化对威氏海链藻的影响	26
2.1.1 实验材料及实验方法	26
2.1.2 实验结果	30
2.2 Mesocosm 中海洋酸化对浮游植物生理的影响	40
2.3 讨论	45
第 3 章 海水低氧及其与海水酸化的耦合效应	47
3.1 实验材料与方法	47
3.1.1 藻种与培养条件	47
3.1.2 碳酸盐系统及氧浓度控制方法	47
3.1.3 其他参数的测定	48
3.2 实验结果	48
3.2.1 氧气浓度与碳酸盐系统	48
3.2.2 低氧对威氏海链藻生长生理的影响	49

3.2.3 海水低氧与海水酸化的耦合效应	53
3.3 讨论	59
参考文献	61

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Contents

Abstract..... II

1 Introduction.....1

1.1 Ocean Acidification.....1

 1.1.1 Chemical Effect.....4

 1.1.2 Effect on Phytoplankton.....6

1.2 Seawater Deoxygenation and Upwelling.....9

 1.2.1 Effect of Hypoxia on Marine Biology and Ecology 15

1.3 Methodology16

 1.3.1 Method for Ocean Acidification Researches 16

 1.3.2 Method for Controlling the Dissolved Oxygen 21

1.4 Research Objectives and Scheme25

2 Physiological Responses of Phytoplankton to OA26

2.1 Physiological Response of *Thalassiosira weissflogii* to OA26

 2.1.1 Materials and Methods.....26

 2.1.2 Results.....30

2.2 Physiological Response of Phytoplankton to OA in Mesocosm40

2.3 Discussion.....45

3 Seawater Deoxygenation and its Combine Effect with OA to *T. weissflogii*47

3.1 Materials and Methods.....47

 3.1.1 Species and Culture Condition.....47

 3.1.2 Controlling of Carbonate System and Oxygen concentration47

 3.1.3 Growth Rate and Other parameters.....48

3.2 Results48

 3.2.1 Carbonate System and Oxygen concentration48

 3.2.2 Response of *T. weissflogii* to Hypoxia49

 3.2.3 Combined effect of Hypoxia and OA53

3.3 Discussion.....	59
References	61

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

自工业革命以来,大气中 CO_2 浓度急剧升高,导致气候变暖、海洋酸化(pH 下降)等,与此同时,海水溶解氧含量也在逐年降低,导致低氧化及“生物致死区域”扩大。近岸水域,赤潮过后经常会出现低氧与酸化的现象。在上升流区,底层海水涌至中表层,导致 pH 与溶氧浓度下降。为此,生长于这些海域的生物,必然会受到酸化和低氧化的复合影响。威氏海链藻(*Thalassiosira weissflogii*)作为一种常见的浮游硅藻,如何响应海水酸化与低氧化的问题,需要从生理生态学的角度,进行探讨。本文以该藻为主要研究对象,探讨了酸化和低氧化对其生长和光合生理的影响以及这两种因子的复合效应。主要结果如下:

CO_2 浓度升高引起的海水酸化,对该藻生长速率的影响,在光期与暗期,存在显著差异。20 °C,低光($70 \mu\text{mol}\cdot\text{photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)条件时,在光期,酸化(pCO_2 约 1000, pH 为 7.8~7.9, HC)使得威氏海链藻细胞分裂加快,增加了约 17%;而在暗期,酸化降低了其细胞分裂速率,降低了约 13%。另外,现今环境 CO_2 浓度条件(pCO_2 约 400, pH 为 8.1~8.2, LC)下,其生长速率暗期的大于光期的(约高 26.5%);而在酸化条件下,则光期的略大于暗期的(6.4%, 差异不显著)。光期结束时的细胞大小以及光期开始 2 小时后有效光化学量子产率, HC 的比 LC 的分别高 0.6%和 5%。另外,酸化对威氏海链藻生长的影响还与光强有关:25 °C,中低光($200 \mu\text{mol}\cdot\text{photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, LL)条件时,酸化促进其生长,增加了约 3%;25 °C,高光强($400 \mu\text{mol}\cdot\text{photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, HL)条件时,酸化抑制其生长降低了约 2.8%。低氧对威氏海链藻生长的影响也与光强有关,在以上各种光强条件下,低氧处理不同程度的促进了其生长,在 LL 和 HL 条件下,分别促进了 9.5%和 3.4%。同时,低氧还会影响威氏海链藻对酸化的相应,在中低光条件下,下调了酸化对其生长的促进;而在高光条件下,则下调了酸化对生长的抑制(下调至约 2%)。这种现象的生理学机制,可能与 CO_2/O_2 浓度比有关,影响了 RubisCO 羧化作用与氧化作用之间的比例,也可能与酸化、低氧化在光期和暗期对呼吸的差别性影响有关。

关键词: 海洋酸化; 海水低氧化; 威氏海链藻 ; 硅藻

Abstract

Since the onset of the industrial revolution, the CO₂ concentration in the atmosphere increasing rapidly, which result in global warming, ocean acidification and some other environmental problem. At the same time, the dissolved oxygen in the seawater decrease yearly, inducing hypoxia and the expanding of “OMZs”. In coastal seawater, hypoxia and acidification could happen during upwelling and in post-bloom water. Organisms living in this area must be influenced by this environmental change. To investigate the physiological effect of these change on phytoplankton, CO₂ and oxygen perturbation experiments were conducted to the wide spread, bloom forming diatom *Thalassiosira weissflogii*. *T. weissflogii* was grown under two pCO₂ condition, ambient (400 μatm, pH 8.1-8.27, LC) and elevated pCO₂ condition expected in the end of this century (1000 μatm, pH 8-7.9, HC), and two oxygen concentration condition, 2% (~25 μmol/L) and 21% (~220 μmol/L) atm. The main results are as follows:

The effect of the pCO₂ increasing induced acidification on *T. weissflogii* is significantly different in light and darkness. Under 20 °C, low light density (70 μmol·photons·m⁻²·s⁻¹) *T. weissflogii* grew about 17% faster in high pCO₂ condition compared to that under ambient condition in the light period; while it grew 13% slower in the darkness. In LC condition, the growth rate is 26.5% faster than that in the darkness; however, in HC condition, there was no significant different. The effect of ocean acidification on the three days mean growth of *T. weissflogii* rely on the light density, under 200 μmol·photons·m⁻²·s⁻¹ (Low light, LL) the high pCO₂ condition grown cell grew 3% faster than cell grown in low pCO₂ condition. But, under 400 μmol·photons·m⁻²·s⁻¹ (High light, HL) cells grown 2.8% slower in high pCO₂ condition than in low pCO₂ condition.

In low oxygen concentration condition, the growth rate in ambient pCO₂ condition were improved by 9.5% and 3.4%, respectively, in LL and HL. Which could be explained by low respiration and high photosynthesis in low oxygen. In low oxygen, 200μmol·photons·m⁻²·s⁻¹ condition, the improvement of high pCO₂ on the

growth rate of *T. weissflogii* was down-regulated, there is no significant difference between HC and LC; while in $400 \mu\text{mol}\cdot\text{photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ light condition, the restriction of high pCO_2 were alleviated to 2%. The physiological mechanism of this phenomenon may because at different CO_2/O_2 ratio the ratio of carboxylation and oxygenation reaction were different and the different effect of acidification and hypoxia in light and darkness.

Key Words: ocean acidification; oxygen depletion; *Thalassiosira weissflogii*; diatom

缩略词 (Abbreviations)

AT	Total Alkalinity	总碱度
CCMs	CO ₂ Concentrating Mechanisms	无机碳浓缩机制
Chl	Chlorophyll	叶绿素
CPM	Counts Per Minute	放射性物质每分钟的计数
DIC	Dissolved Inorganic Carbon	溶解无机碳
DO	Dissolved Oxygen	溶解氧
ETR	Electron Transport Rate	电子传递速率
F _m	Maximal Fluorescence	暗适应最大荧光值
F _v	Variable Florescence	暗适应可变荧光值
F _m '	Instant Fluorescence	光适应最大荧光值
F _v /F _m	Maximum Quantum Yield	最大量子产量
F _v '/F _m '	Effective Quantum Yield	有效量子产量
HC	High pCO ₂ (1000 μatm)	高二氧化碳分压
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	联合国政府间气候变化专门委员会
LC	Low pCO ₂ (390 μatm)	低二氧化碳分压
NPQ	Non-Photochemical Quenching	非光化学淬灭
OA	Ocean Acidification	海洋酸化
OMZs	Oxygen Minimum Zones	氧浓度最小区
PSII	Photosystem II	光系统II
RCPs	Representative Concentration Pathways	代表性浓度途径
μ	Specific Growth Rate	比生长速率
σ _{PSII}	Functional Absorption Cross-section of PSII	光系统II有效光吸收截面 积

第1章 文献综述与研究意义

自工业革命以来随着人类利用大自然的能力的加强,同时也在改变着大自然。随之而至的环境问题接连的被报道出来,如光化学烟雾、酸雨、雾霾、水体富营养化、温室效应、海平面上升、海洋酸化。由于全球气候变化会导致海洋的各种变化,其中就包括由于温度升高等因素引起的海水溶氧的下降,OMZs区域的扩张等。加之低氧上升流、水体富营养化等引起的变化,在近海低氧已经影响到浮游植物的生长区域。对于这些问题人类不仅是自食恶果,这些“恶果”也在影响着整个地球的其他生物。海洋酸化是已经确定发生了的环境问题,其引起的海水化学变化必然影响着生活于其中的生物。如,对碳酸钙溶解度的影响导致珊瑚的消融。一位海洋科学家曾说过这样一句话——“我告诉我的孩子们,赶快去看海、去看珊瑚吧,因为在不久的将来,它们可能不复存在”。

1.1 海洋酸化

海洋酸化是指由于海水对二氧化碳的吸收,使得 pH 在较长一段时间内(通常数十年或者更长)持续下降的现象(Broecker & Clark, 2001; Caldeira & Wickett, 2003),其描述的是海水 pH 的下降,而不是说海水变得呈酸性。现今,外海表层海水的平均 pH(total scale)变化范围为 7.8 到 8.4,所以海洋仍然是碱性的(Feely et al., 2009; Orr et al., 2005b)。酸化还可以是由化学物质的增加或降低、生物呼吸作用等引起,其中由于人类活动导致海洋 pH 降低的部分被称为人为海洋酸化(IPCC 2011)。

目前海洋的总无机碳储量差不多是大气的 50 倍(Sabine et al., 2004),因此即使海洋无机碳库很小的改变也会对大气二氧化碳浓度产生影响。海洋是人类来源二氧化碳的一个重要的汇,自工业革命以来,人类活动(化石燃料使用,森林砍伐,水泥生产等)所产生的约 25%的二氧化碳为海洋所吸收(Le Quéré et al., 2010; Mikaloff et al., 2006; Sabine et al., 2004),这一过程明显的降低了大气中的二氧化碳浓度,将全球变暖的一些影响降到最低,但是也明显改变了海水的化学

成分。自工业革命至今，海洋表层水的 pH 平均值已下降约 0.1 个单位，从大约 8.2 下降到 8.1，对应的氢离子浓度增加了 26% (Feely et al., 2009; Orr et al., 2005a)。

图 1-1 是莫纳罗亚山大气中二氧化碳浓度及太平洋 Aloha 站位表层海水二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2$) 以及 pH 随时间变化趋势，可以看出表层海水二氧化碳分压的变化趋势是与大气增幅基本一致，是逐年上升的，而 pH 则是逐年下降的，但由于大规模的海洋过程年际变化使得表层海水二氧化碳分压变化更有多多样性。在 IPCC 第五次评估报告中，定义了一套四个新场景来做新的气候模型模拟，即代表性浓度途径 (Representative Concentration Pathways, RCPs)，在所有的 RCP 场景中所预测的 2100 年的大气二氧化碳浓度都要高于现今的二氧化碳浓度，预计本世纪末大气二氧化碳分压可能从现今的约 $400 \mu\text{atm}$ 增加到约 $1000 \mu\text{atm}$ ，超过了自冰期间冰期以来 80 万年的最高水平 (IPCC 2007)，而平均表层海水 pH 值可能比现今的要低 0.2 到 0.4 (图 1-2)。

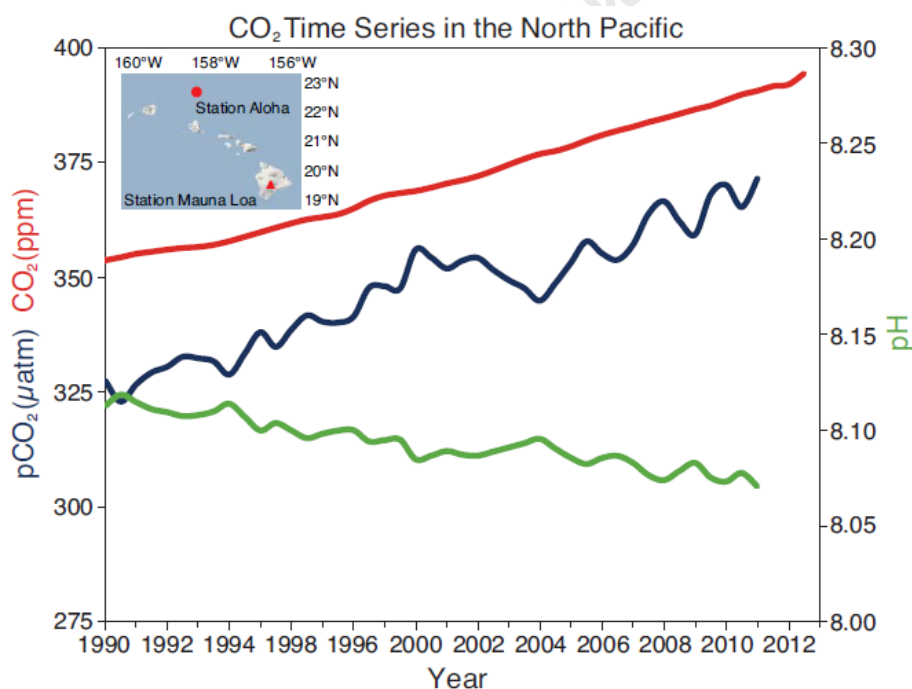


图 1-1 莫纳罗亚山大气中二氧化碳浓度 (体积百万分之一, ppmv, 红色) 及太平洋 Aloha 站位海水表层二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2$, μatm , 蓝色) 以及 pH (绿色) 随时间变化趋势 (续 Dore et al. 2009; 数据来自 Dore et al., 2009)。

Figure 1-1. A smoothed time series of atmospheric CO₂ mole fraction (in ppm) at the atmospheric Mauna Loa Observatory (top red line), surface ocean partial

pressure of CO₂ (pCO₂, middle blue line) , and surface ocean pH (bottom green line) at Station ALOHA in the subtropical North Pacific north of Hawaii for the period from 1990–2011 (after Doney et al., 2009; data from Dore et al., 2009).

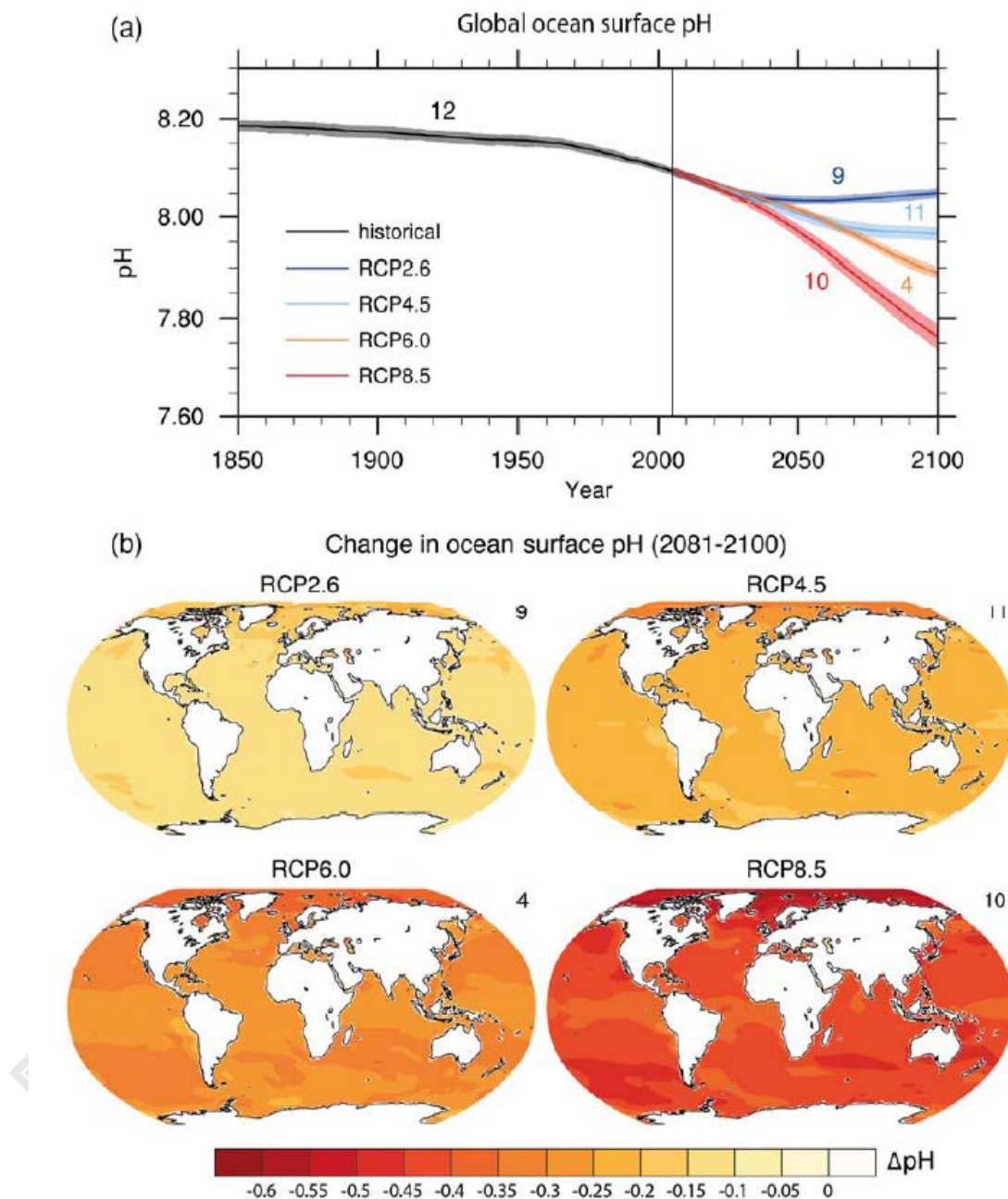


图 1-2 (a) 至本世纪末 (2081–2100) 不同场景 (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5) 对应的表层海水 pH 的时间序列 (模型平均值和最大-最小值范围) 和

全球分布; (b) 表示的是相对于 1986-2005 年全球表层海水 pH 值得变化 (IPCC 2013)。

Figure 1-2. (a) Time series (model averages and min-max ranges) and (b) maps of multi-model surface ocean pH for the scenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5 in 2081–2100; The maps in (b) show change in global ocean surface pH in 2081-2100 relative to 1986–2005 (IPCC 2013).

1.1.1 海洋酸化对海水化学的影响

二氧化碳溶入海水后通过一系列的化学反应, 也就是碳酸盐系统的热力学平衡改变海水的化学平衡。二氧化碳溶解于水会形成弱酸碳酸 (H_2CO_3), 随着溶解二氧化碳的增加, 海水 pH、碳酸根 (CO_3^{2-}) 和碳酸钙 (CaCO_3) 的饱和度都会下降; 而碳酸氢根 (HCO_3^-) 的浓度则会上升, 氢离子浓度也会上升。pH 是对数标度, 所以 1 个单位的变化对应于氢离子浓度的 10 倍的变化。在二氧化碳增强释放情景下, 预计到 2100 年表层海水 pH 可能会降低 0.3-0.4, 对应的是 H^+ 浓度增加 100-150% (Houghton et al., 2001)。二氧化碳溶于海水后会与之发生反应, 导致溶解二氧化碳 ($\text{CO}_2(\text{aq})$)、碳酸、碳酸氢根浓度升高:



图 1-3 为海水中碳酸盐系统形态及形态间发生的一些平衡反应示意图, 海水总碱度一般定义为海水中“过剩的碱”, 或过剩的质子接受体的总和, 总碱度的组成离子在图中用淡蓝色表示。总二氧化碳 (TCO_2) 是碳酸、碳酸氢根和碳酸根离子浓度的总和。海水总碱度则是保守性的, 可以缓冲 pH 的变化, 因为其中含有多种酸碱对, CO_2 的加入不会改变总碱度。现今空气平衡状态下, pH 值约为 8.1, 海水中的碳酸氢根占总溶解无机碳的 90%, 碳酸根占 9%, 而溶解态的二氧

化碳只占约 1%。正常海水中上述方程中产生的氢离子 99.99% 的会与碳酸根结合形成碳酸氢根。所以，额外的人类来源的二氧化碳进入海水后会同时降低 pH 和消耗碳酸根如图 1-3 左表示。随着 H^+ 浓度的增加，碳酸根浓度的降低，海水中的与之相关的离子的浓度和形态也会随之发生变化。如 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 的浓度将增加 (Millero, 2009)。而碳酸钙（方解石、文石）的饱和度会降低。碳酸根是一些海洋生物合成碳酸钙骨骼或被壳的必需底物，例如：珊瑚、一些海洋浮游植物、贝类。酸化对他们的影响大部分取决于碳酸钙的饱和度 (Ω)，即钙离子和碳酸根离子的浓度积除以文石或方解石的表现化学当量溶度积：

$$\Omega_{arag} = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}]/K'_{sparag} \quad (5)$$

$$\Omega_{cal} = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}]/K'_{spcal} \quad (6)$$

当 Ω 值小于 1.0 时海水就会变得有腐蚀性未受到保护的碳酸钙就会被溶解 (R. A. Feely et al., 1988)。近年的一些研究表明由于海洋对人类来源的二氧化碳的直接吸收很多海域的文石饱和临界点的深度变浅了 40 到 200 m (Caldeira & Wickett, 2005; Feely et al., 2004; Orr et al., 2005)。海洋酸化过程中海水化学成分变化 (pH 降低, pCO_2 升高) 会进一步改变碳酸盐缓冲系统, 当 pCO_2 升高到一定程度后海水吸收 CO_2 的能力将会下降 (Zeebe et al., 2008)。

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.

廈門大學博碩士論文摘要庫