

学校编号：10384

分类号_____

密级_____

学 号：B9927003

UDC_____

学 位 论 文

南北极海区夏季海-气二氧化碳交换特征及其所 揭示的海洋学问题研究

—— 海-气 CO₂ 交换通量、表层海水 CO₂ 分压的分布特征、主要调控因子、
及其在碳循环与全球变化研究上的意义与影响 ——

高 众 勇

指导教师姓名：陈立奇 教授（厦门大学海洋系）

申请学位级别：博 士 专业名称：海洋化学

研究方向：极地环境科学

论文提交日期：2002. 9. 论文答辩日期：2002. 9.

学位授予单位和日期：厦门大学 2002

答辩委员会主席：黄荣辉 院士（中科院大气物理所）

评阅人：_____、_____、_____

2002 年 9 月

**Characteristics of Air-Sea Exchange of CO₂
in the Arctic and Antarctic Regions as well
as their Relative Oceanography**

A Dissertation Presented

By

Zhongyong GAO

Supervisor: Professor Liqi Chen

Submitted to the Graduate School of Xiamen University

for the Degree of

DOCTOR OF PHILOSOPHY

September 2002

Department of Oceanography, Xiamen University

目 录

摘 要	.....
ABSTRACT	.....
第一章 绪 论	.....1
1. 全球变化与大洋碳循环	.....1
1.1 大气 CO ₂ 与碳循环	.....2
1.2 海洋对大气 CO ₂ 的吸收	.....4
1.2.1 生物泵	.....4
1.2.2 物理泵 (溶解泵)	.....4
1.2.3 海洋对 CO ₂ 吸收能力的变化	.....6
1.2.4 全球大洋碳的源汇分布格局	.....8
2. 南大洋在全球大洋碳循环研究中的作用	.....8
3. 南大洋碳循环研究进展	.....9
3.1 南大洋浮游植物叶绿素与初级生产力	.....9
3.2 南大洋营养盐浓度与初级生产力限制	.....10
3.3 DOC、POC 贮库及有机碳通量	.....12
3.4 南大洋深海沉积通量	.....12
3.5 南大洋海-气 CO ₂ 交换及 pCO ₂ 调控因子	.....13
4. 南大洋碳循环与全球变化：影响及其反馈	.....14
5. 北冰洋碳循环研究进展	.....15
6. 国内在南北极的研究成果与现状	.....15
7. 存在问题	.....16
7.1 两极碳汇的时空变异	.....18
7.2 Fe 限制与 Fe 假说	.....18
7.3 紫外辐射增加对初级生产的影响	.....18
8. 本论文的选题意义和研究内容	.....18
8.1 选题意义	.....19
8.2 主要研究内容	.....19

第二章 方 法	20
1. 海 - 气 CO ₂ 通量研究方法概况	20
2. 海 - 气 CO ₂ 通量研究方法述评	24
3. 本研究中所使用的实验方法	25
3.1 方法原理	26
3.2 实验仪器	26
3.3 观测方法	26
3.4 数据处理方法	28
第三章 全球大气 CO ₂ 分压 (<i>P</i> CO ₂) 纬度分布	29
1. 大气 CO ₂ 的纬度分布	31
2. 大气 CO ₂ 的昼夜变化	33
3. 大气 CO ₂ 分压的季节变化	37
4. 南大洋大气 CO ₂ 分压的经度分布	39
5. 与其它结果的比较	40
第四章 从北极至南极表层海水 CO ₂ 分压 (<i>p</i> CO ₂) 的 时空变异及其通量研究	42
1. 上海 - 南极	45
1.2 11 月份 CO ₂ 源汇纬度分布状况	45
1.3 3 月份 CO ₂ 源汇纬度分布状况	45
1.4 各主要海区 CO ₂ 分压变化	45
1.4.1 东海及台湾海峡	45
1.4.2 南中国海	47
1.4.3 热带海区	47
1.4.4 南印度洋	47
1.4.5 普里兹湾	47
2. 上海 - 北冰洋	48
2.1 表层海水 CO ₂ 分压的纬度分布	48
2.2 <i>p</i> CO ₂ 季节变化	49
3. 南极至北极沿途航线上各海区海 - 气	

CO ₂ 交换通量	49
3.1. 海 - 气 CO ₂ 通量计算方法	49
3.2. 海 - 气 CO ₂ 交换通量	50
3.2.1. 11 月份上海 - 南极中山站沿途 航线各海区 CO ₂ 通量	50
3.2.2. 3 月份南极中山站 - 上海沿途 航线各海区 CO ₂ 通量	52
3.2.3. 7 月份上海 - 北极沿途航线各 海区 CO ₂ 通量	53
3.2.4. 8 月份北极 - 上海沿途航线各 海区 CO ₂ 通量	54
3.2.5. 南极至北极沿航线上各海区碳 通量比较	55
4. 小 结	56
第五章 不同海区表层海水 CO₂ 分压主要调 控因子研究	57
1. $p\text{CO}_2 \sim \text{SST}$ 相关关系及其异常	59
1.1 南大洋水文学特征	59
1.2 南大洋锋面结构与系统对 $p\text{CO}_2$ 变化的影响	59
1.2.1 亚南极锋 (SAF)	63
1.2.2 亚热带锋 (STF)	63
1.2.3 南极辐散带 (AD, 65°S 附近)	63
1.2.4 季节性冰带 (SIZ, 60°S 以南)	64
1.3 东海	64
2. CO ₂ 源汇分布的主要调控因子分析	64
3. 小 结	65
第六章 南大洋海冰区 CO₂ 分布特征及通量研究	67
1. 南大洋不同海区间 CO ₂ 的源汇分布的差异	67
1.1 南印度洋海区	68

1.2 南大西洋海区	69
1.3 德雷克海峡	69
1.4 普里兹湾大洋测区	69
2. 季节变换差异对 CO ₂ 源汇状态的影响	71
3. 南大洋海冰区夏季 CO ₂ 通量	73
4. 南大洋海冰区夏季对 CO ₂ 吸收能力	75
5. 小 结	76
第七章 普里兹湾大洋测区海 - 气 CO ₂ 分布特征及通量研究	77
1. 普里兹湾地理、水文概况	77
2. 普里兹湾 pCO ₂ 的平面分布特征	77
3. pCO ₂ 与叶绿素的关系	81
4. 普里兹湾 73°E 断面研究	81
5. 普里兹湾夏季海-气 CO ₂ 交换通量	82
6. 小 结	83
第八章 海冰区在南大洋碳循环中的作用研究	84
1. 南大洋区域概况	85
2. 南大洋海冰区与非海[11]冰区差异比较	87
2.1 pCO ₂ 分布特征差异	87
2.2 pCO ₂ 与叶绿素 a 的相关关系比较	87
2.3 pCO ₂ 与 SST 之间的相关关系比较	87
2.4 南大洋营养盐分布特征与碳循环	88
3. 小 结	88
第九章 白令海、楚克奇海夏季 CO ₂ 分布特征及其所揭示的海洋学意义	97
1. 观测数据的应用方法	98
2. pCO ₂ 分布特征及其所揭示的海洋学问题	98
2.1 pCO ₂ 不饱和与叶绿素空间变化的解耦合	98
2.2 白令海盆 pCO ₂ 的分布特征及其与 pH 变	

化的相关性	102
2.3 白令海盆边缘海洋学特征	102
2.4 白令陆坡流的作用与影响	103
2.5 白令海不同水团进入北冰洋时的保守混 合：白令海峡 $p\text{CO}_2$ 变化研究	106
2.5.1 白令海峡处进入北冰洋的不同亚 北极北太平洋水团的识别	108
2.5.2 不同水团在白令海峡的保守混合	108
2.5.3 第三支流的存在	108
2.5.4 二种水团性质差异及其成因	109
2.6 亚北极北太平洋水对北冰洋碳汇的影响	110
2.6.1 北冰洋的断面研究	110
2.6.2 白令海及楚克奇海 $p\text{CO}_2$ 及 pH 值的平面分布 ..	111
2.6.3 北冰洋碳汇的纬度相关性	116
2.6.4 亚北极北太平洋水对北极碳汇的意义	116
3. 小 结[A4]	117
第十章 结 语	118
参考文献	123
致 谢	138
附 录 在学期间发表和交流的论文	140

表 目 录

第二章 方法

表 2-1 主要实验仪器	27
--------------	----

第四章 从北极至南极表层海水 CO_2 分压 ($p\text{CO}_2$) 的时空变异及其通量研究

表 4-1 航线上各海区源汇格局季节变化比较	46
表 4-2 上海 - 南极中山站沿途航线各海区 CO_2 通量计算表	51
表 4-3 南极中山站 - 上海沿途航线各海区 CO_2 通量计算表	52
表 4-4 上海 - 北极沿途航线各海区 CO_2 通量计算表	53
表 4-5 北极 - 上海沿途航线各海区 CO_2 通量计算表	54
表 4-6 南极 - 北极沿途航线各海区 CO_2 通量比较	55

第五章 不同海区表层海水 CO_2 分压主要调控因子研究

表 5-1 澳大利亚以南南大洋主要水文锋面及 海区的标准定义	61
-----------------------------------	----

第六章 南大洋海冰区 CO_2 分布特征及通量研究

表 6-1. 夏季南大洋 80oW - 80oE 大气与表层 海水 CO_2 分压差	72
表 6-2. 南大洋海冰区碳通量	74
表 6-3. 世界其它海区的碳通量值比较	75

第七章 普里兹湾夏季海-气 CO_2 分布特征及其通量研究

表 7-1. 普里兹湾地区湾内与湾外碳通量比较表	82
--------------------------	----

目 录

第一章 绪 论

图 1-1 夏威夷 Mauna Loa 观测站 40 年来大气 CO ₂ 浓度变化 及近 10 年间表层海水总 CO ₂ 浓度的增长	1
图 1-2 2000 年气候系统的热量辐射全球平均值	2
图 1-3 天然碳循环的主要组成	4
图 1-4 人类活动对全球碳循环的扰动	4
图 1-5 大洋碳循环示意图	6
图 1-6 大洋的温跃层环流可被绘制成一条各大洋之间相互 联系的传送带	6
图 1-7 大洋碳循环过程示意图	7
图 1-8 控制南大洋海-气 CO ₂ 交换的二个主要物理过程	9
图 1-9 南北半球陆架区的分布	17

第二章 方 法

图 2-1 海-气 CO ₂ 分压测量实验装置图	27
图 2-2 “雪龙船”上的海-气 CO ₂ 交换测量实验室	28

第三章 全球大气 CO₂ 分压 (PCO₂) 纬度分布

图 3-1 全球大气 CO ₂ 测量采样航行路线图	29
图 3-2 全球大气 CO ₂ 的纬度分布	30
图 3-3 2000 年 3 月南极至上海航线上大气 CO ₂ 分压与大气 压的关系	32
图 3-4 1999 年 11 月上海至南极航线上大气 CO ₂ 分压与大气 压的关系	32
图 3-5 上海至南极往返航线上大气 CO ₂ 分压与大气压的关系	33
图 3-6 1999 年 11 月 9 日 - 10 日, 船停新加坡港口锚地时 大气 CO ₂ 日变化	34
图 3-7 南大洋大气 CO ₂ 日变化	35
图 3-8 1999 年 1 月 12 日南大洋停船检修时大气 CO ₂ 分压定 点观测结果	35
图 3-9 1999 年 12 月 31 日 - 2000 年 1 月 1 日船停合恩角锚	

地时大气 CO ₂ 定点观测结果	36
图 3-10 大气 CO ₂ 分压定点观测结果与强风节律的变化[A1] 关系	36
图 3-11 大气 CO ₂ 分压定点观测结果与强风节律的变化[A2] 关系	37
图 3-12 大气 CO ₂ 浓度的季节变化	38
图 3-13 南北极航线上大气压的季节及纬度变化	38
图 3-14 南大洋同一纬度带大气 CO ₂ 浓度的经度分布	39
图 3-15 南大洋同一纬度带大气 CO ₂ 浓度与大气压的相关性	39
图 3-16 意大利至南极 94/95, 96/97, 98/99 大气 CO ₂ 浓度测量结果	40

第四章 从北极至南极表层海水 CO₂ 分压 ($p\text{CO}_2$) 的时空变异及其通量研究

图 4-1 1999 年 11 月 - 2000 年 4 月中国第 16 次南极科学考察航行路线图	42
图 4-2 1999 年 7 - 9 月, 中国首次北极科学考察航线图	42
图 4-3 1999 年 11 月 上海至南极中山站航线上表层海水 CO ₂ 分压随纬度分布	43
图 4-4 2000 年 3 月 南极中山站至上海航线上表层海水 CO ₂ 分压随纬度分布	44
图 4-5 1999 年 7 - 9 月 上海至北冰洋航线上表层海水 CO ₂ 分压随纬度变化分布图	48

第五章 不同海区表层海水 CO₂ 分压主要调控因子研究

图 5-1 11 月份上海 - 中山航线上各海区 $p\text{CO}_2$ ~SST 关系图	58
图 5-2 3 月份中山 - 上海航线上各海区 $p\text{CO}_2$ ~SST 关系图	58
图 5-3 南大洋纬向上覆水锋面作用机制示意图	62

第六章 南大洋海冰区 CO₂ 分布特征及通量研究

图 6-1 中国第 16 次南极科学考察中山 - 长城站往返航线图	68
-----------------------------------	----

图 6-2	12 月份中山 - 长城站间 $p\text{CO}_2$ 随经度分布变化	70
图 6-3	1 月份中山 - 长城站间 $p\text{CO}_2$ 随经度分布变化	70
图 6-4	普里兹湾表层海水 CO_2 分压 ($p\text{CO}_2$) 随纬度的分布变化	71
图 6-5	12 月及 1 月份中山 - 长城间 $p\text{CO}_2$ 随经度分布变化	73

第七章 普里兹湾大洋测区海 - 气 CO_2 分布特征及 通量研究

图 7-1	普里兹湾大洋站位分布及航线图	78
图 7-2	普里兹湾表层海水 CO_2 分压平面分布图	78
图 7-3	普里兹湾叶绿素平面分布图	78
图 7-4	普里兹湾叶绿素与 $p\text{CO}_2$ 的相关性分析	79
图 7-5	普里兹湾 73°E 断面 营养盐纬度分布图	80
图 7-6	普里兹湾 73°E 断面 $p\text{CO}_2$ 及其相关要素纬度分布图	80

第八章 海冰区在南大洋碳循环中的作用研究

图 8-1	南大洋水文分区机构图	85
图 8-2	南大洋 - 全球海洋通量联合研究 (SO - JGOFS) 计划工作组确定的南大洋的四个主要亚系统	86
图 8-3	南大洋 $p\text{CO}_2$ 的纬度分布 (2000 年 3 月)	89
图 8-4	南大洋 $p\text{CO}_2$ 的纬度分布 (1999 年 11 月)	90
图 8-5	图 8-4 中 62°S 处 $p\text{CO}_2$ 变化密集点详细变化	90
图 8-6	海冰区 $p\text{CO}_2$ 与叶绿素纬度分布的镜像相关性 (1) 2000 年 3 月南极长城站至中山站航线 (2) 1999 年 11 月南极中山站至长城站航线	91 92
图 8-7	非海冰区 $p\text{CO}_2$ 与叶绿素纬度分布的不相关	93
图 8-8	海冰区与非海冰区 $p\text{CO}_2 \sim \text{SST}$ 关系比较	94
图 8-9	合恩角 Ba Hately 锚地 $p\text{CO}_2 \sim \text{SST}$ 关[14]系定点观测结果	94
图 8-10	南大洋海冰区 $p\text{CO}_2 \sim \text{SST}$ 关系定点观测结果	95
图 8-11	南大洋营养盐分布特征	96

第九章 白令海、楚克奇海夏季 CO_2 分布特征及其 所揭示的海洋学意义

图 9-1	采样断面分布及水[A5]文环流示意图	99
图 9-2	白令海盆 $p\text{CO}_2$ 、 pH 及叶绿素纬度变化断面分布	100

图 9-3	白令海盆 $p\text{CO}_2$ 、pH 及叶绿素经度变化断面分布	101
图 9-4	白令陆坡流影响的证据	
	(1): B2 断面延续航线上的证据	104
	(2): 白令海西岸启航、归航往返航线上的证据	105
图 9-6	白令海峡水团保守混合研究:走航观测路线及水流示意图	106
图 9-7	白令海峡不同水团的识别	107
图 9-8	白令海峡表层海水 $p\text{CO}_2$ 保守混合变化曲线	109
图 9-9	白令海峡两股湾流混合 $p\text{CO}_2$ 变化图	110
图 9-10	北太平洋水对北冰洋水影响:7 月及 8 月 170°W 断面 $p\text{CO}_2$ 及 pH 值变化	112
图 9-11	北太平洋水进入北冰洋的影响研究:P 断面的研究结果	113
图 9-12	白令海及楚克奇海表层海水二氧化碳分压平面分布图	114
图 9-13	白令海及楚克奇海表层海水 pH 实测值平面分布图	114
图 9-14	楚科奇平台区(环形断面) $p\text{CO}_2$ 变化及其与纬度的相关性	115
第十章	结 语	118

摘要

本研究利用 1999 年中国首次北极科学考察、以及 1999 - 2000 年度的中国第 16 次南极科学考察机会对沿途航线上全球纬度范围的海区的海-气交换进行了详细的调查,描绘了大气及表层海水 CO_2 分压 ($p\text{CO}_2$) 的全球纬度特征及其在不同海区之间的差异,并着重研究了南大洋及北冰洋的表层海水 CO_2 分压 ($p\text{CO}_2$) 的分布特征,讨论并揭示其所代表海洋学问题及意义。文章讨论了各海区 CO_2 分压 ($p\text{CO}_2$) 与表层海水温度 (SST)、水文物理过程影响及生物吸收等因素的相关关系,研究控制 $p\text{CO}_2$ 变化的主要调控因子。并利用这些关系,研究 $p\text{CO}_2$ 在南大洋及北冰洋的分布特征,讨论其特殊性,探讨其所揭示的有关海洋学问题和规律。借助于全球各海区 $p\text{CO}_2$ 主要调控因子的分析,本论文重点研究了南、北极海区。在南大洋,根据 $p\text{CO}_2$ 的变化特征,找到海冰区与非海冰区的性质的巨大差异,为研究南大洋海冰区在全球变化中的作用与反馈提供了依据;同时,在白令海及北冰洋,根据 $p\text{CO}_2$ 的分布特征,找到了整个白令海水文环流对北极碳汇的显著影响,并发现整个北太平洋亚北极水的保守混合性质,为北极地区在全球变化研究中的作用提供了重要依据。

详细的主要研究结果如下:

1. 从南极至北极沿途航线各海区对大气 CO_2 的吸收能力如下(大气 CO_2 的汇区之间比较):

南大洋海冰区(夏季 3 月份) > 北冰洋夏季(8 月份) > 北太平洋西北部(7 月份) > 东海(3 月) > 楚克奇海(夏季 8 月及 7 月) > 北太平洋西北部(8 月份) > 台湾海峡(11 月) > 白令海(夏季 7 月及 8 月) > 鄂霍次克海(7 月) > 白令海峡(8 月) > 台湾海峡(3 月) > 东黄海(7 月) > 东海(11 月) > 白令海峡(7 月) > 30 - 40°S 南印度洋(11 月) > 30 - 40°S 南印度洋(3 月) > 日本海(7 月) > 30°S 以北南印度洋(11 月)

2. 南中国海 3 月份吸收通量几乎为零外,而在 11 月份时其为大气 CO_2 的源,其它 CO_2 的源区主要是热带海区、40° - 60°S 南印度洋、以及南极辐散带,其中,40° - 60°S 南印度洋在 11 月份及 3 月份都有很高的负通

量，为显著的大气 CO_2 的源。

3. 整个南大洋是一个复杂多变的水文学区域，其自身包含着的亚系统以及各种水文锋面，都会对 $p\text{CO}_2$ 的分布特征产生重要的影响。在夏季高生产力季节，海冰区由于融冰淡水分层带来的水体垂直稳定性的影响等原因，有利于浮游植物生长，生产力大大提高，逐渐发展成生物因子控制表层海水的 $p\text{CO}_2$ 特征。而在非海冰区，这种影响并不显著，因而形成海冰区与非海冰区的巨大差异。这使得南大洋在大规模尺度上，可以划分为海冰区和非海冰区两大部分。
4. 在海冰区夏季的高生产力季节，生物影响通常都能够发展成 $p\text{CO}_2$ 的主要调控因子，比如，夏季普里兹湾湾内地区全部被生物过程影响所主控，并成为 CO_2 的一个强汇区；但在一些海区，水文物理过程依然可以主控着 $p\text{CO}_2$ 的变化，比如普里兹湾外的南极辐散带，由于绕极深层水 (CDW) 的向上涌升，本来是强汇的普里兹湾一下子变成大气 CO_2 的源区，这是由于受到富含 CO_2 的深层水影响的原因，所以，虽然整体上，夏季海冰区 $p\text{CO}_2$ 的分布特征主要由生物影响所主控，但在一些局部的海区水文物理过程仍然产生控制作用。
5. 相比之下，北冰洋夏季 $p\text{CO}_2$ 的分布受到环流的影响十分明显，并且带有很显著的保守性。这种保守性为检测北太平洋亚北极水对北极碳汇的影响起到了十分重要的作用。根据这一特性，可以研究白令海水向楚克奇海的输移过程、变化以及影响。研究发现，虽然前人的结果表明，白令海的 $p\text{CO}_2$ 特征受生物生产力影响控制，但这是在高生产力的陆架区的情况，在深海的白令海盆情况并不相同，其 $p\text{CO}_2$ 的特征显著地受到水文环流的影响，而不是生物因子在控制。另一方面，其自身带有明显的 HNLC 性质。多数研究者也都认同这一观点。
6. 北极海区的这一显著特性为研究北极地区的碳循环及其在全球变化中的作用与反馈有着十分重要的意义。一方面，由于北太平洋水是北冰洋营养盐的一个来源，而北冰洋表层营养盐在夏季几乎耗尽，因此从 HNLC 的白令海盆流过来的白令海亚北极水，将有利于北冰洋夏季浮游植物的生长，形成有机碳汇。另一方面，注入白令海的淡水来源的无机碳在白令海没有向深海输出，而通过阿拉斯加沿岸流全部注入北冰洋，形成一个重要的无机碳汇，这两大碳汇都将在北极对全球变化的响应中起着十分重要的反馈作用。

7. $60^{\circ}\text{E} - 80^{\circ}\text{W}$ 之间的南大洋海冰区在整个夏季都是大气 CO_2 的净汇区, 其 CO_2 的源汇分布状况可描述为: (对大气 CO_2 的吸收能力) 南大西洋东、西部 ($45^{\circ}\text{W} - 30^{\circ}\text{W}$ 及 $10^{\circ}\text{W} - 10^{\circ}\text{E}$) > 南印度洋 > 南大西洋中部 > 德雷克海峡。在普里兹湾内是大气 CO_2 的强汇区, 如果去除湾外 CDW 涌升流的影响, 普里兹湾 $p\text{CO}_2$ 的分布将具有明显的纬度相关性, 即越近冰边缘, 其生物生产力越高, 相应的 $p\text{CO}_2$ 值也越低。其最低值可达 $180\mu\text{atm}$, 出现在 III - 12 连续站以南、中山站附近的冰架边缘地区, 反映了冰边缘有较高的生产力。
8. 利用 CO_2 通量模式估算, 南大洋的 $60^{\circ}\text{E} - 80^{\circ}\text{W}$ 之间观测区, 夏季 (12 月及 1 月份) 的 CO_2 由大气输入海水的平均通量为 $5.42 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 其中 1 月份通量约为 12 月份通量的 2 倍。反映了南大洋海冰区夏季高生产力对南大洋碳通量的显著影响。

关键词： 二氧化碳、海 - 气交换、碳通量、全球变化、
南大洋、北冰洋和亚北极水、中国南、北极科
学考察 (CHINARE)

Characteristics of Air-Sea Exchange of CO₂ in the Arctic and Antarctic Regions as well as their Relative Oceanography

ABSTRACT

This study has based on the data from the First Chinese National Arctic Research Exploration and the 16th Chinese National Antarctic Research Expedition (CHINARE-16), respectively in July to September 1999 and November 1999 to April 2000. The partial pressure of carbon dioxide in surface sea water and atmosphere ($p\text{CO}_2$ and $P\text{CO}_2$) along the tracks of two cruises was continually measured during the summer voyages. Distributions of $p\text{CO}_2$ and $P\text{CO}_2$ were described in different areas along the tracks. Characteristics of the distribution of $p\text{CO}_2$ in those two regions were specially stressed and their implications in oceanography were also discussed in more detail. Relationships have been calculated between partial pressure of carbon dioxide and its relative factors, such as the surface seawater temperature (SST), effect of hydrographic processes, and biological uptakes. Using these analyses, the importance of the Arctic and Antarctic Regions in future's global change were revealed. In the Southern Ocean, great differences between ice zone and none ice zone were found out based on characteristics of $p\text{CO}_2$, which offered important foundation to the role and feedback of seasonal ice zone of the Southern Ocean in global change. Also we found the dominating effect of circulation in Bering Sea on the carbon sink of Arctic, in Bering sea and the Arctic Ocean, and we found the conservative character of whole the subarctic water in the North Pacific Ocean, which is an important foundation on the role of the Arctic in global change.

Some results can be summarized as the followings:

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.

厦门大学博硕士学位论文摘要库