

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 21220051302209

UDC

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

南海夏季海表 $p\text{CO}_2$ 及海-气二氧化碳通量
遥感研究

Surface Water $p\text{CO}_2$ and Air-Sea CO_2 Fluxes in the South
China Sea in Summer-Estimations by Using Remote Sensing
Data

朱 钰

指导教师姓名: 商少凌 教授

专业名称: 环境科学

论文提交日期: 2008年8月

论文答辩时间: 2008年8月

学位授予日期: 2008年 月

答辩委员会主席: 陈立奇 研究员

评 阅 人: 陈立奇 研究员

评 阅 人: 胡建宇 教授

2008年8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

摘要

准确定量海-气 CO_2 通量并掌握其在不同时空尺度上的变化是全球碳循环与气候变迁研究的中心任务之一，尤其在各种海洋学要素时空变化剧烈的边缘海。现场实测海表 $p\text{CO}_2$ 是估算海-气二氧化碳的主要手段，显然这种方法在时空尺度上具有一定局限性。本研究尝试针对中国南海的夏季时段，发展应用卫星遥感参数间接估算夏季二氧化碳海-气通量的方法。

首先利用 2004 年夏季南海北部现场走航数据，根据海表 $p\text{CO}_2$ 与 SST 和 Chl *a* 的相关性，分别得出两种海表 $p\text{CO}_2$ 的经验算法：SST 单参数算法和 SST、Chl *a* 双参数算法。将遥感 SST 和 Chl *a* 数据代入算法反演出夏季南海北部 $p\text{CO}_2$ 分布，并由 2000 年夏季航次的实测数据对计算结果进行验证。验证结果表明，双参数的遥感算法优于单参数遥感算法，两种算法的结果与实测值的 RMS 分别为 $25.1\mu\text{atm}$ （单参数算法）和 $4.6\mu\text{atm}$ （双参数算法）。

根据双参数算法计算夏季南海北部海区海表 $p\text{CO}_2$ 分布，1998 年夏季由于厄尔尼诺事件导致的南海高温现象使得该年夏季海表 $p\text{CO}_2$ 值高于其他年份， $p\text{CO}_2$ 的平均值为 $413.8\mu\text{atm}$ ，而其他年份夏季 $p\text{CO}_2$ 值变化不大，平均值维持在 $400\sim 405\mu\text{atm}$ 左右。由该海区夏季海表 $p\text{CO}_2$ 的空间分布来看，近海海表 $p\text{CO}_2$ 值普遍低于外海，北部湾内海区的海表 $p\text{CO}_2$ 值也较湾外低，大多在 $380\mu\text{atm}$ 左右。进一步结合 QuikSCAT 卫星风场数据对该海区二氧化碳海-气通量分布进行估算，结果表明，受海表 $p\text{CO}_2$ 分布和风场分布共同控制，夏季南海北部 CO_2 通量分布呈现东部高于西部、海盆中央高于陆架区的格局。中国、越南近海以及南海北部湾区域的 CO_2 通量与南海东南部海区 CO_2 通量相对较小，约 $3.5\text{ mmol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ 左右，南海东南部较高 ($7\sim 9\text{ mmol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ day}^{-1}$)。夏季南海北部是大气的碳源，2000-2005 年期间，其碳源作用大致呈现逐年减弱的趋势。

上升流是南海普遍存在的现象。当上升流发生时，由于水团混合及生物响应，局部海区海表 $p\text{CO}_2$ 呈现复杂变化。根据 2007 年夏季在南海中部越南以东海区观测到的上升流现象，利用现场实测数据，我们建立上升流海区海表 $p\text{CO}_2$ 的遥感算法，经过独立数据检验，该算法具有较好的精度，RMS 值为 $11.3\mu\text{atm}$ ，基本上能够反映上升流的物理混合作用对海表碳酸盐体系的影响。结合卫星风场数

据对八月的南海（105~120°E,10~15°N）二氧化碳海-气通量进行估算，上升流事件对上升流海区碳通量的贡献约为 24.6%，对整个研究海域碳通量的贡献约为 1.2%。

关键词：南海；碳通量；卫星遥感

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Determining the air-sea CO₂ flux is essential in studying the global carbon cycling and the climate change. Up to date, the air-sea CO₂ fluxes are primarily estimated by shipboard measurements of the air and sea surface pCO₂ on research cruises, which obviously have limitations of spatial and temporal coverage.

An empirical approach is presented for the estimation of partial pressure of carbon dioxide (pCO₂) and air-sea CO₂ fluxes in the northern South China Sea (SCS) in summer using satellite-derived sea surface temperature (SST), chlorophyll-a (Chl a) concentration, and wind field. Two algorithms were attempted. The first one used an SST dependent equation, and the other having Chl a introduced. Regression equations were developed for summer based on *in situ* data obtained in July, 2004. Using the monthly average SST and Chl a fields derived respectively from the AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) and SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field of View Sensor), monthly pCO₂ fields were computed. The derived pCO₂ were compared with the shipboard pCO₂ observations conducted in July, 2000. That one derived from the SST dependent algorithm resulted in a root mean square error (RMS) of 25.1 μatm, while the other derived from the SST-Chl a dependent algorithm resulted in a RMS of 4.6 μatm. This suggests that the satellite-derived pCO₂ was in general agreement with the *in situ* observations when the SST-Chl a algorithm is applied.

The pCO₂ distribution in the northern South China Sea in summer from 1998 to 2005 was then estimated by applying the SST-Chl a dependent algorithm. It is shown that pCO₂ in 1998 was 413.8 μatm, which is the highest among the 8 years and is probably associated with the significant warm event occurring in the SCS in response to the 1997-1998 El Niño. On the other hand, pCO₂ in coastal areas is lower than in the basin water, for example, the averaged pCO₂ in the Gulf of Tongkin was approximately 380 μatm.

The air-sea CO₂ flux was further computed with the aid of monthly mean QuikSCAT wind speed. The CO₂ flux was lower in the western region than in the eastern region, and also was lower in coastal areas than in the basin water. For example, the averaged sea to air CO₂ flux off Vietnam and in the Gulf of Tongkin is approximately 3.5 mmol CO₂ m⁻² day⁻¹, while it ranges between 7~9 mmol CO₂ m⁻² day⁻¹ in the northeastern SCS.

Upwelling frequently occurs in the SCS, which may change the surface pCO₂ distribution from the normal state. Based on a dataset obtained from a cruise survey conducted in the water offshore Vietnam (where upwelling occurs) in August 2007, we attempted to develop a SST-dependent empirical function specific to the upwelling water. By applying this model and the above SST-Chl *a* dependent algorithm to upwelling and non-upwelling waters, respectively, pCO₂ distribution for the whole basin in August 2007 was then estimated. The results were compared with in situ measured data, which were not used to derive algorithms and were thus an independent dataset, resulting in a RMS of 11.3 μatm. The air-sea CO₂ flux was also calculated, indicating that the upwelling event we detected might give a rise of CO₂ flux by 1.2% for the whole SCS basin, when the potential subsequent biological drawdown had not been considered.

The results presented here are nevertheless preliminary. We contend that more shipboard data are necessary in refining the empirical algorithms and reducing the uncertainty.

Key words: South China Sea; Carbon flux; Remote sensing

目录

第一章 前言	1
1.1 准确定量南海海-气 CO ₂ 通量的意义	4
1.2 现场测量估算海-气 CO ₂ 通量的方法	4
1.2.1 ¹⁴ C 示踪法	5
1.2.2 O ₂ 法	5
1.2.3 ¹² C/ ¹³ C 比值法	6
1.2.4 海-气界面 CO ₂ 分压差法	6
1.2.5 微气象法	8
1.3 遥感估算海-气二氧化碳通量方法原理与研究现状	9
1.4 研究设想、技术路线和目标	12
1.5 论文结构	13
第二章 研究区域背景与数据	14
2.1 关于南海	14
2.1.1 南海的地理位置	14
2.1.2 南海气候	15
2.1.3 南海海洋学特征	16
2.2 数据来源	17
2.2.1 遥感数据	18
2.2.2 实测数据	19
第三章 南海北部夏季海表二氧化碳分压及其海-气通量的遥感估算	22
3.1 基础数据及其筛选	21
3.2 单参数算法	22
3.3 双参数算法	28
3.4 算法验证	32
3.5 南海北部夏季遥感海表 pCO ₂ 分布	34
3.6 南海北部夏季 CO ₂ 海-气通量	41
3.7 小结	46
第四章 南海中部越南以东海区夏季遥感pCO₂及其海-气通量	48

4.1 上升流海区的特征.....	48
4.2 数据来源.....	49
4.3 上升流海区 $p\text{CO}_2$ 算法.....	53
4.4 算法验证.....	55
4.5 通量估算.....	59
4.6 讨论.....	61
第五章 结论与展望	62
5.1 主要结论.....	62
5.2 尚未解决的问题与展望.....	63
参考文献	65

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 The importance of quantify the air-sea CO ₂ flux.....	4
1.2 Methods to estimate air-sea CO ₂ flux.....	4
1.2.1 ¹⁴ C tracer method.....	5
1.2.2 O ₂ method.....	5
1.2.3 ¹³ C/ ¹² C method.....	6
1.2.4 Air-sea pCO ₂ difference method.....	6
1.2.5 Micrometeorology method.....	8
1.3 Method and present studies of air-sea CO ₂ flux via remote sensing technique	9
1.4 Idea, technique and aim of this study.....	11
1.5 Configuration of the thesis.....	13
Chapter 2 Background of studied area and data source.....	15
2.1 South China Sea.....	15
2.1.1 Location of South China Sea.....	15
2.1.2 Climate of South China Sea.....	16
2.1.3 Characteristic of South China Sea.....	17
2.2 Data source.....	18
2.2.1 Remote sensing data.....	18
2.2.2 In situ data.....	20
Chapter 3 Calculation of pCO₂ and air-sea CO₂ flux in South China Sea.....	22
3.1 Base data and data filtration.....	22
3.2 One parameter algorithm.....	23
3.3 Two parameters algorithm.....	29
3.4 Validation of algorithm.....	33
3.5 pCO ₂ distribution of Northern South China Sea.....	35
3.6 Air-sea CO ₂ Flux of Northern South China Sea.....	42
3.7 Conclusion.....	47

Chapter 4 pCO₂ and air-sea CO₂ flux of mid south china sea.....49

4.1 The characteristics of upwelling region.....49

4.2 Data source.....50

4.3 Algorithm of upwelling region.....54

4.4 Validation of algorithm.....56

4.5 Calculation of air-sea CO₂ flux.....60

4.6 Conclusion.....62

Chapter 5 summary and prospect.....63

5.1 Major conclusion.....63

5.2 Problem and prospect.....64

References.....66

第一章 前言

工业革命以来，由于化石燃料使用等人为活动，导致大气二氧化碳的平均浓度从过去 42 万年中的 $180\sim 300\ \mu\text{L/L}$ ^[1] 上升到现在的约 $380\ \mu\text{L/L}$ ^[2,3] (图 1-1)。目前大气 CO_2 已达 40 万年来的最高值，全球不断升温，已对地球生态系统、人类生存环境和社会经济可持续发展构成严重威胁。虽然大气中 CO_2 增加的原因已经较为清楚，但是一直没有采取什么切实的行动来减少 CO_2 的排放，原因之一就是寻求替代燃料价格昂贵。所以，如何把已经产生的过剩 CO_2 去除就更令人感兴趣。据估算，人类活动每年向大气排放 70 亿吨碳，其中约一半存留在大气，另一半的去处和驱动机制是全球碳循环研究的核心科学问题^[4]。为了正确评估人类活动对全球气候变化的影响，一个最重要的基本工作就是弄清人类活动的温室气体排放量并提供准确的温室气体源汇排放和吸收清单^[5]。

海洋是地球上最大的碳库。海水储藏了 38 万亿吨碳，是大气圈的 50 倍、陆地生态系统的 19 倍。因此占地球表面积 71% 的海洋作为大气 CO_2 重要的汇区^[6]，对全球气候的变化具有关键性的调控作用，而海-气界面 CO_2 通量是评估海洋在全球变化中作用的前提和基础^[7]。准确定量海-气 CO_2 通量并掌握其在不同时空尺度上的变化是全球碳循环与气候变迁研究的中心任务之一。但迄今为止，无论是陆地还是海洋，碳循环研究仍存在诸多不确定性^[8,9]。

十几年前，国际 IGBP 发起了有史以来最大的海洋调查计划——全球海洋通量联合研究 (JGOFS)。JGOFS 以及相关国际研究计划 10 多年的研究证实了海洋在全球碳循环中至关重要的作用，经过世界海洋环流实验 (WOCE) 和全球海洋通量联合研究 (JGOFS) 等国际大型海洋研究计划的努力，我们对大洋的 CO_2 源汇作用问题已经有了比较深入的认识，但全球不同储库的碳收支估算尚不能平衡，碳通量的估算依然存在很大的不确定性。由此，2001 年，国际地圈生物圈计划 (IGBP)、世界气候研究计划 (WCRP)、全球环境变化国际人文因素计划 (IHDP) 和生物多样性国际计划 (DIVERSITAS) 首次联合启动全球碳计划 (GCP)^[10]。其核心目标在于降低全球碳通量估算的不确定性。当前还有许多研究计划如表层海洋与低层大气研究 (Surface Ocean Low

Atmosphere Study)、北美碳计划(North American Carbon Program, NACP)^[11]等科学计划及全球海洋碳观测系统(Global Ocean Carbon Observation System)^[12]、大尺度CO₂观测计划(Large Scale CO₂ Observation Plan)^[13]等观测计划的核心问题都是海-气CO₂的交换^[4]。

卫星海洋遥感是利用电磁波与大气和海洋的相互作用原理,从卫星平台观测和研究海洋的分支学科^[14]。卫星海洋遥感为海洋观测和研究提供了一个崭新的数据集。这个数据集覆盖了相当部分海洋环境参数和信息,包括海表温度、大气水汽、叶绿素浓度、悬移质浓度、CDOM浓度、重力异常、海洋降雨、有效波高、海浪方向谱、海面白帽、内波、浅海地形、海面风场、海面油膜、海面污染、CO₂海/气交换等方面。海洋遥感技术与传统的船舶、浮标数据相比,具有大面积同步观测、时空分辨率较高、受天气和地理环境及人为因素限制小等无可比拟的优势。由于卫星遥感数据在时空观测频度上的优越性,海洋遥感技术逐渐成为一个不可或缺的观测手段得到广泛运用,在各国科学家研究海洋二氧化碳源汇机制中发挥日趋重要的作用。

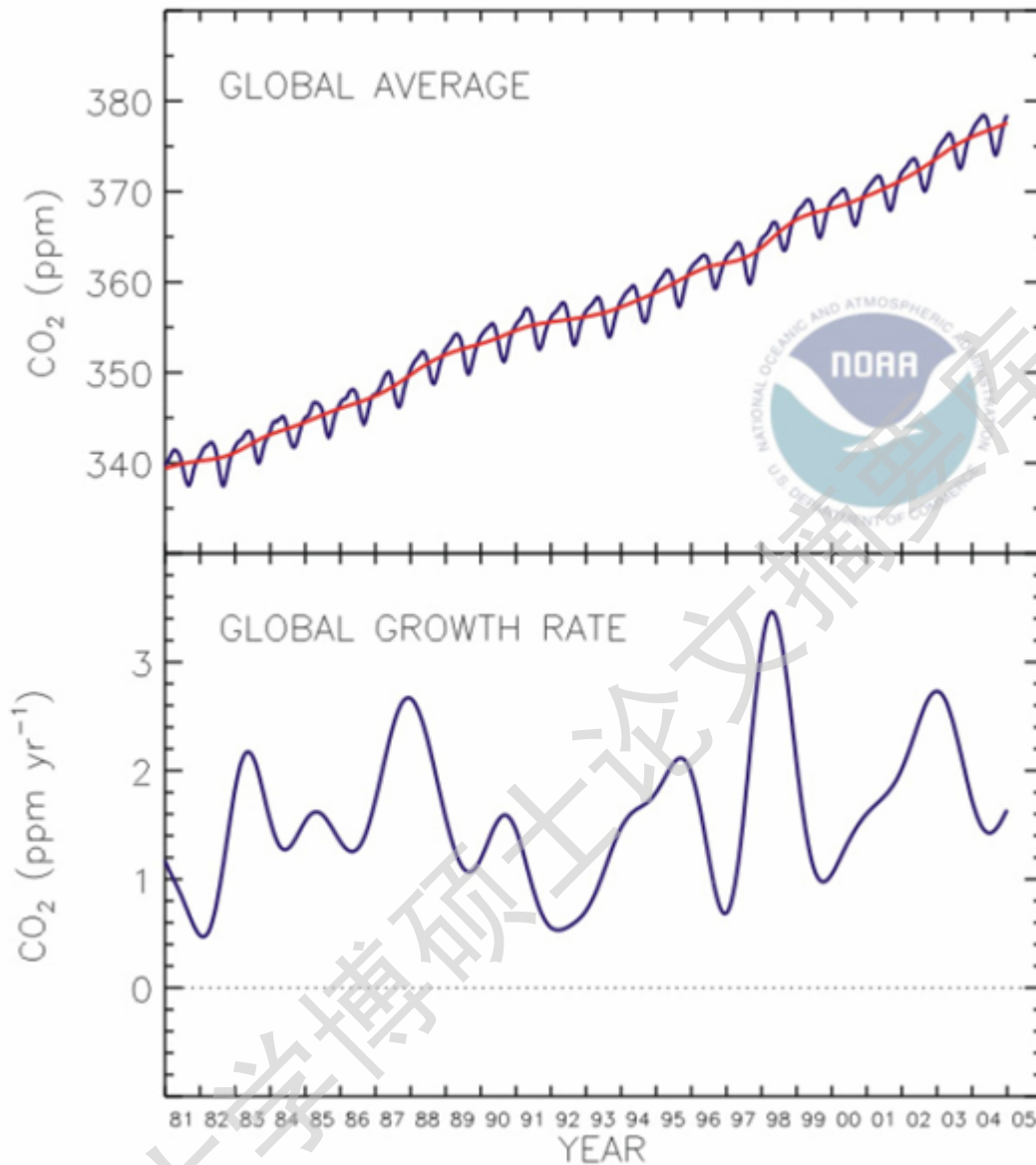


图1-1: 上图: 全球平均大气CO₂变化趋势图

下图: 全球平均大气CO₂增长速率

图来源 <http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg>

Fig.1-1: Above:Global atmosphere CO₂ content trend

Below: Global atmosphere CO₂ content increase rate

1.1 准确定量南海海-气 CO₂ 通量的意义

随着中国经济的高速发展,一次性能源需求不断扩大,所排放的二氧化碳也逐年增多。按照国际环境署2004年12月10日的统计,中国二氧化碳排放量占全球排放总量的13%,全球排名仅次于美国^[15],因此中国的碳循环问题日益受到国际社会的关注。目前,我们对中国陆地生态系统碳收支问题已有了一定程度的认识^[16-19],但对于占国土面积25%的海域的碳循环研究十分薄弱。深入研究中国近海源汇过程有助于为中国的碳收支建立一个基于科学理论与数据的清单,以策应“后京都协议时代”给中国带来的巨大国际压力。

另一方面,目前虽然对海洋洋盆(basin)的源汇量级有了较一致的认识,但对近岸海域(marginal seas 或 coastal seas)仍缺乏足够的研究,目前还不能较好地定量其通量大小,在源汇问题上也存在不少争议^[20-23]。

南海是全球主要的边缘海之一,是中国发展海洋经济的重要区域,同时也是中国邻近海域碳收支的关键区域之一^[24]。目前,南海海域已明显受到海运、油气生产、污染排放等人类活动的影响^[25]。有研究表明,1951年至1990年,南海海温升高了约0.3°C^[26]。最近10年来,南海上层更表现出年代尺度上的变暖,总体趋势为0.15°C yr⁻¹,由此导致南海海平面以1 cm yr⁻¹的速率上升^[27]。南海CO₂源汇过程以及碳循环如何响应这种气候变异尚不得而知^[28],因此在南海开展碳循环研究、准确定量海-气CO₂通量意义重大。

1.2 现场测量估算海-气 CO₂ 通量的方法

目前估算海-气 CO₂ 通量的方法大体上可归为两类,其中一类基于物质守恒原理在全球尺度上估算海-气 CO₂ 交换通量,如放射性同位素 ¹⁴C 示踪法、碳的稳定同位素比例法、通过测量大气 O₂ 的镜像法等;另一类则是采用各种手段实测目标研究海域的海-气 CO₂ 通量,再通过统计的方法对区域乃至全球的海-气 CO₂ 通量进行估算^[29]。对于实测法计算海-气 CO₂ 通量,依据计算通量的手段不同,又可分为间接估算和直接测量方法两类。间接估算法是目前最为广泛采用的一种方法,主要通过采用各种测量仪器系统分别实测表层海水和海表大气中的 pCO₂ (CO₂ 分压),然后根据二者的差值及相应的交换系数来估算海-气 CO₂

通量，其中测量海-气 $p\text{CO}_2$ 的手段主要有水气平衡-非分散红外测量法^[30]和原位传感器观测法，两种方法各有其优缺点及适用范围。直接通量测量方法主要以微气象学方法为主，在大气侧直接测量并计算海-气界面 CO_2 ，这其中又以涡动相关法为主要代表，目前已有众多研究者已经或正在进行各种实验测量，但仍处于尝试阶段，并未进行大规模应用^[31-36]。

1.2.1 ^{14}C 示踪法

根据 ^{14}C 在海水中的垂直分布，并基于物质平衡及海水热力学、动力学原理，可以通过建立模型估算 CO_2 的海-气交换速率、通量及其在混合层和深海混合过程^[37]。该模型基于以下假设：1、工业革命之前，海洋既不是 CO_2 的源也不是汇；2、工业革命之前，海洋中 ^{14}C 的分布处于稳态，即大气输入的 ^{14}C 和衰变的 ^{14}C 相等，那么海-气之间的 ^{14}C 交换平衡可简单用下式表示^[38]：

$$\text{进入海洋中的}^{14}\text{C} \approx \text{逸出海洋的}^{14}\text{C} + \text{海洋内部衰减的}^{14}\text{C} \quad (1-1)$$

当大气 CO_2 由于化石燃料的燃烧逐渐增加的时候， CO_2 在大气、表层海水及深海之间平衡被打破，海洋中的天然及人为（核试验产生） ^{14}C 就成为指示 CO_2 交换、校准此类海洋碳循环模型的最佳工具。研究者们应用该模型得出的全球海洋碳汇的大小基本在 2 Pg C a^{-1} 左右^[37, 39]。

1.2.2 O_2 法

假设在工业革命前，全球各碳库之间处于动态平衡，人为活动产生的 CO_2 是打破这种平衡的主要驱动因素。化石燃料燃烧产生的 CO_2 和消耗的 O_2 有一定的比例关系因此，我们可以根据观测到的大气中 O_2 变化量和从化石燃料燃烧计算的变化量来估算海洋与陆地生物圈的碳收支，如果观测值大于计算值，则说明陆地生物圈 O_2 减少了，释放 CO_2 ；如果观测值小于计算值，则陆地生物圈吸收 CO_2 。测量大气 O_2 估算 CO_2 收支方法的优点在于地球上95%的 O_2 存在于大气中，只有5%存在于海洋中，因此，相对于 CO_2 ， O_2 的海-气交换对大气中 O_2 浓度的影响基本可以忽略^[40]，因此计算大气 O_2 的收支就相对简单。该方法的缺点是由于大气中 O_2 含量比 CO_2 高3个数量级（约 $209000 \mu\text{atm}$ ），而由化石燃料燃烧导致的 O_2

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