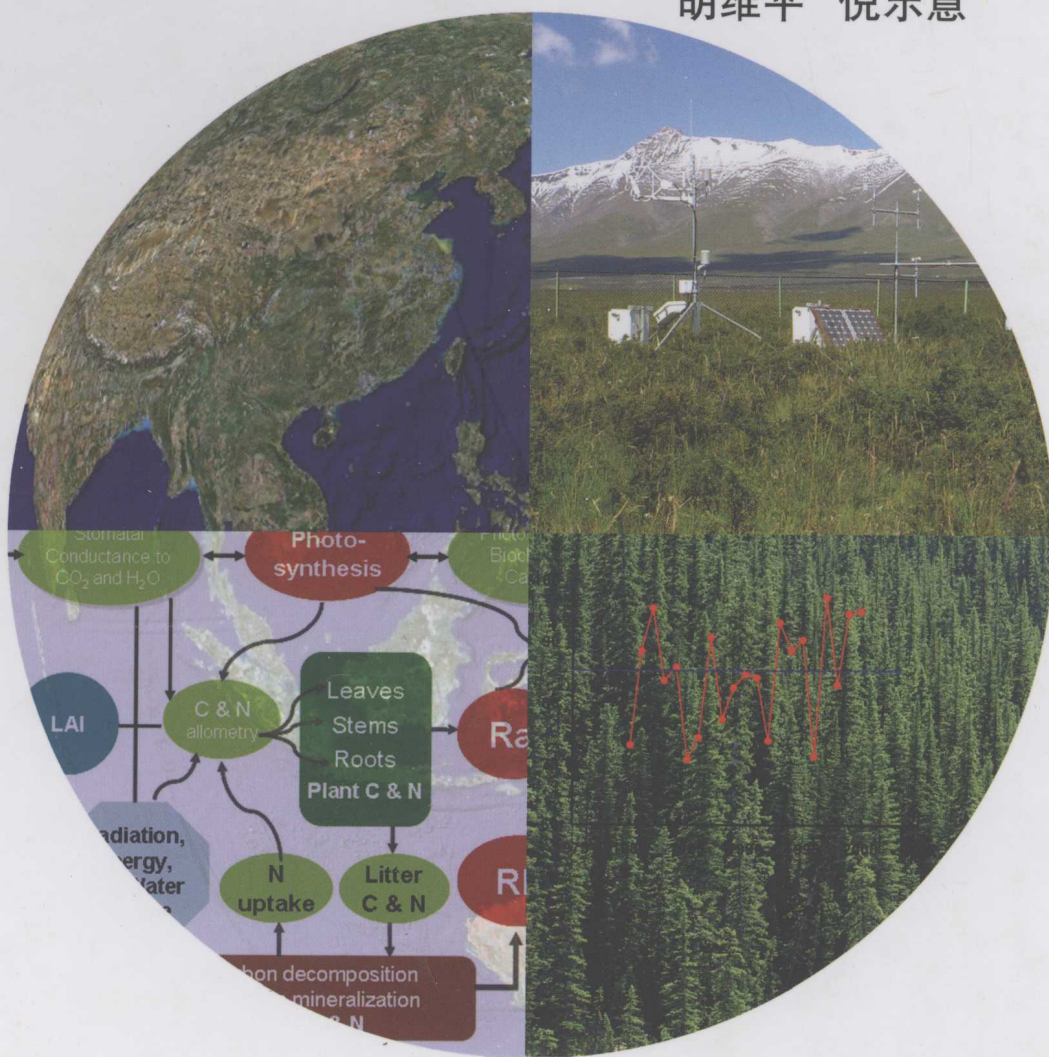


中国科学院知识创新工程重大项目
“中国陆地和近海生态系统碳收支研究” 系列专著

中国近海与湖泊碳的生物地球化学

宋金明 徐永福 等著
胡维平 倪乐意



科学出版社
www.sciencep.com

中国科学院知识创新工程重大项目
“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”系列专著

中国近海与湖泊碳的 生物地球化学

宋金明 徐永福 胡维平 倪乐意 等著



科学出版社

北京

Biogeochemistry of Carbon in China Seas and Lakes

Song Jinming, Xu Yongfu, Hu Weiping, Ni Leyi *et al.*

•

Science Press
Beijing

内 容 简 介

本书系中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”(KZCX1-SW-01)成果之一,是该项目在水域生态系统设立的四个课题的有关近海与内陆水体的碳循环过程及模式研究成果的系统总结,是我国第一部有关近海与湖泊碳循环研究的专门著作。本书共分六章,前四章分别阐述了中国近海典型海域(长江口、胶州湾和南黄海等)碳收支过程与北太平洋对人为碳的吸收模式,后两章分别阐述了长江中下游典型湖泊(太湖、东湖等)的碳收支过程。本书最大特点是所有的研究结论均是建立在大量调查数据的基础上,并有诸多原始性的创新发现。

本书可供海洋科学、湖泊科学、环境科学、生态学、地理学等领域的科研、教学人员及本科生、研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国近海与湖泊碳的生物地球化学/宋金明等著. —北京:科学出版社, 2008

(中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”系列专著)

ISBN 978-7-03-020143-0

I. 中… II. 宋… III. ①近海-生态系统-碳循环-生物地球化学-研究-中国②湖泊-生态系统-碳循环-生物地球化学-研究-中国 IV. P734.2 P343.3 X511

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第188658号

责任编辑:胡晓春 李久进 王新玉 / 责任校对:桂伟利

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008年3月第一次印刷 印张:34 1/2

印数:1—1 500 字数:790 000

定价:110.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序 一

众所周知，在人类社会日益关注全球环境问题的今天，大气中二氧化碳和甲烷等温室气体浓度升高诱发的全球气候变化已成为世界经济可持续发展和国际社会所面临的最为严峻的挑战。为了应对这个挑战，国际社会采取了一系列重大行动。1992年在巴西里约热内卢召开了联合国环境与发展大会，签署了《联合国气候变化框架公约》，1997年12月在日本东京通过了著名的《京都议定书》等，试图通过人类社会的共同努力，将大气二氧化碳稳定在某一个水平上，规避其可能给人类社会带来的重大负面影响。

从科学的角度看，二氧化碳和甲烷等温室气体浓度升高诱发的全球气候变化尚存在诸多不确定性。全球碳循环是其中的重要方面，它控制着大气二氧化碳浓度的变化。为此，国际地圈生物圈计划（IGBP）、国际全球环境变化人文因素计划（IHDP）、世界气候研究计划（WCRP）以及国际生物多样性计划（DIVERSITAS）联合发起了以全球碳循环为主要研究内容的全球碳计划（GCP），该计划的实施极大地推动了全球碳循环与气候变化科学的发展。

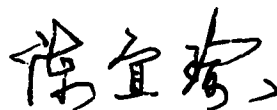
中国地域广阔，陆地和近海生态系统复杂多样，拥有自寒温带至热带的气候带和特殊的植物地理区域，为研究全球碳循环提供了良好的实验平台。同时，我国的社会经济正处在高速发展阶段，这为研究世界经济发展对全球碳循环和气候变化的影响提供了难得的社会经济背景。

我国的碳循环研究起步较晚，但起点较高、发展迅速。2001年中国科学院启动了知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”，共有18个研究所（中心、植物园）和中国生态系统研究网络（CERN）的400余名科研人员参与了该项研究。通过为期5年的研究，该项目取得了一系列研究成果，主要包括：构建了ChinaFLUX研究平台、中国碳循环数据信息系统、中国陆地和近海生态系统碳循环模型和模型集成系统；初步明确了驱动生态系统碳循环过程的关键气候因子、生物学因子和人类活动的影响；初步明确了中国陆地和近海生态系统碳源汇时空格局及其对气候变化的响应，并评价了不同技术措施下中国陆地生态系统碳增汇潜力等。这些研究成果是迄今为止对中国陆地和近海生态系统碳收支较为全面的认识，对我国制定碳管理策略和参与气候公约谈判具有重要的参考价值。本系列专著是对

上述研究成果的全面总结，是国内首部关于中国陆地和近海生态系统碳收支研究的系统性学术著作。本系列专著的出版不仅展示了中国学者在该领域的最新研究成果，而且对推动我国全球变化科学、生态学、气候学、土壤学、地理科学、海洋科学和遥感科学等学科的发展具有重要意义。

本系列专著的作者们是活跃在我国碳循环与全球变化研究领域的中青年学者。我十分欣慰地看到他们正在成长，也赞赏他们那种刻苦钻研、勇于探索的科学精神。一分耕耘，一分收获。希望他们继续努力，将我国生态系统碳循环与全球变化研究推向新的高度，取得更多、更大的进展。

国家自然科学基金委员会主任
中国科学院院士



2007年6月于北京

序 二

近百年来,以全球变暖为主要标志的气候变化对世界经济、社会和生态环境等产生了重大影响,严重威胁着各国经济的可持续发展和国家安全。地球系统碳循环是连接诸如温室气体、全球变暖和土地利用等重大全球变化问题的纽带,是在更高层次上推进学科交叉和综合集成的切入点。对全球和区域碳循环的深入研究不仅可为认识和控制全球气候变化提供理论基础,而且有助于制定生态系统管理策略以适应和减缓气候变化的影响。

为了在区域和国家尺度上回答与中国陆地和近海生态系统碳循环相关的科学问题,中国科学院于2001年启动了知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”,共有18个研究所(中心、植物园)(地理科学与资源研究所、大气物理研究所、海洋研究所、遥感应用研究所、沈阳应用生态研究所、植物研究所、南京土壤研究所、东北地理与农业生态研究所、南京地理与湖泊研究所、水生生物研究所、寒区旱区环境与工程研究所、亚热带农业生态研究所、生态环境研究中心、成都山地灾害与环境研究所、新疆生态与地理研究所、西北高原生物研究所、华南植物园、西双版纳热带植物园)和中国生态系统研究网络(CERN)的400余名科研人员(包括研究生和博士后)参与了该项研究。该项目的总体目标是以回答科学问题为中心,着眼于为我国社会经济的可持续发展和履行有关国际公约服务。试图通过对中国陆地和近海生态系统碳收支时空格局、碳循环过程和模型、生态系统碳收支对全球变化的响应以及碳增汇、减排技术的系统研究,阐明中国陆地和近海生态系统碳收支的系列科学问题,提高我国在国际全球变化研究领域中的学术地位,为全球变化背景下的中国社会经济的可持续发展以及生态系统的管理提供科学依据,为履行有关国际公约提供基础数据。

经过为期5年的研究工作,该项目在以下4个方面取得了重要进展:

- 1) 构建了ChinaFLUX研究平台、中国碳循环数据信息系统、中国陆地和近海生态系统碳循环模型和模型集成系统。ChinaFLUX的建成,有力地推动了我国生态系统碳通量观测和碳循环的研究,为我国深入开展陆地生态系统物质循环和区域气候响应等研究提供了平台。中国陆地和近海生态系统碳循环模型和模型集成系统实现了多个点尺度模型在同一平台上的模拟,为估算国家尺度的碳收支状况提供了基础。

2) 研究了驱动我国陆地和近海生态系统碳循环过程的关键气候因子、生物学因子和人类活动影响,其成果是迄今为止对不同生态系统碳循环过程较为全面的认识。通过对详尽的历史资料的收集、整理和分析,重新估算了过去 300 年间中国土地利用变化导致的陆地生态系统向大气释放的碳总量,对正确评价我国历史时期土地利用、土地覆被变化对陆地碳收支的影响具有积极意义。

3) 初步明确了中国陆地和近海生态系统碳源汇时空格局及其对气候变化的响应,并得到如下重要结果:过去 20 年中国陆地生态系统碳汇区主要分布在华北、华东、华中、东北及西南大部分地区,碳源区主要分布在西北大部分地区、内蒙古西部等地区,国家尺度上总体为碳汇;中国农田土壤具有明显的碳汇功能;林业工程实施将在未来 50 年内显著增加林木碳储量等。这些研究结果对客观认识我国生态系统的碳汇功能、制定碳管理策略和气候公约谈判策略具有重要价值。

4) 初步评价了不同技术措施下中国陆地生态系统碳增汇潜力,相关研究结果可为我国参与气候变化谈判提供参考依据。

本系列专著是研究项目组成员对上述研究成果的系统总结,包括了 8 本各自独立,但又相互呼应的学术著作。分别为:《中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征》(于贵瑞、孙晓敏)、《中国陆地和淡水湖泊与大气间碳交换观测》(王跃思、王迎红等)、《碳循环遥感基础与应用》(牛铮、王长耀等)、《过去三百年中国土地利用变化与陆地碳收支》(葛全胜、戴君虎、何凡能等)、《中国陆地生态系统碳循环的生物地球化学过程》(韩士杰、董云社、蔡祖聪、宋长春等)、《中国近海与湖泊碳的生物地球化学》(宋金明、徐永福、胡维平、倪乐意等)、《中国陆地生态系统碳收支模型》(黄耀、周广胜、吴金水、延晓冬等)和《中国陆地生态系统碳收支与增汇对策》(陈泮勤、王效科、王礼茂等)。

出版本系列专著的主要目的是向读者系统地展示该项目所获得的最新研究成果,并对未来的发展方向和研究重点进行评述,为读者提供系统性的科学资料和理论知识,以推动我国地球系统碳循环及相关学科的发展。我们衷心感谢项目组全体成员在这 5 年中的良好协作和辛勤努力,并期望在未来的科研活动中能取得更大的突破。

“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”项目首席科技专家

黄 耀 于贵瑞

2007 年 6 月于北京

前 言

“中国陆地和近海生态系统碳收支研究 (KZCX1-SW-01)”是“十五”期间中国科学院知识创新工程面向国家战略需求和国际前沿设立的重大项目。水域生态系统设立的四个课题聚焦于近海与内陆水体的碳循环过程及模式研究,这四个课题——“近海生态系统碳循环过程研究 (KZCX1-SW-01-08)”、“近海生态系统碳循环模型研究 (KZCX1-SW-01-16)”、“内陆水体生态系统循环过程研究 (KZCX1-SW-01-07)”以及“内陆水体生态系统碳循环模型研究 (KZCX1-SW-01-15)”分别由中国科学院海洋研究所、中国科学院大气物理研究所、中国科学院水生生物研究所和中国科学院南京地理与湖泊研究所主持,本专著是这四个课题主要成果的集成和系统总结。本专著还同时得到中国科学院“百人计划”(科人 2003-202)、青岛市科技将才专项计划(04-3-JJ-03, 05-2-JC-90)项目的支持。

众所周知,水是生命之源,是人类可持续发展的基础。海洋与湖泊作为地球上的最重要水体,在人类的发展进程中一直起着至关重要的作用。全球海洋面积约为 3.61 亿 km^2 , 占地球表面积的 70.8%, 其总水量达 13.4 亿 km^3 , 约占地球总水量的 96.5%。我国近海的渤海、黄海、东海和南海总面积 471 万 km^2 , 约为我国国土面积的 49%。全球湖泊总面积约 206 万 km^2 , 总水量约 17.6 万 km^3 , 其中淡水储量约占 52%, 约为全球淡水储量的 0.26%。我国湖泊总面积约 9 万 km^2 , 总水量约 700 km^3 , 约占我国淡水储量的 26%。如此之大的海洋和湖泊在全球变化中起着关键性的作用。就对气候变化的影响而言,海洋表层 3m 所含热量就相当于整个大气层所含热量的总和,大气的水分 86%来自海洋,海洋大约每年可吸收人类活动释放到大气中的 CO_2 的 $1/3 \sim 1/2$ 。因此,地球上的水体特别是海洋,是整个气候系统中最大的能量库,起着稳定和保持气候系统属性的作用,海洋本身的变异和变化对全球尺度的气候变异与气候变化起着关键的调控作用,湖泊则对区域性的气候起着重要的调节作用,这正是“中国陆地和近海生态系统碳收支研究 (KZCX1-SW-01)”在水域设立四个课题进行水体碳循环过程及模式研究的出发点。

海洋是 21 世纪人类社会可持续发展的宝贵财富和最后空间。当今世界面临着人口、资源和环境三大问题,随着陆地资源的日益减少,环境不断恶化,研究、开发和利用海洋是解决这些问题的重要出路之一,海洋已成为当今世界发展、高新技术应用和展示国家科技、经济综合实力的新舞台。目前对全球海洋变化的研究已成为一个与人类生活和社会发展息息相关的热点研究领域,成为人类实现可持续发展重要的理论基础和科学保障。近海是人类赖以生存的重要环境,在中国,40%的人口生活在占陆地面积 13%的沿海省市内,生产了近 60%的 GDP。全球变化、人类活动导致陆海相互作用加剧,保障海洋生态环境的安全与健康已经成为 21 世纪人类面临的重要任务。中国近海是世界

上最宽、生产力最高的陆架之一, 内有大河输入, 外有黑潮驱动, 上有季风盛行, 同时近 20 年来, 沿海城市化趋势日益显见、化肥农药和工业排污量的急剧增加、河流水利工程和近海养殖的大量增多等因素, 对我国近海生态环境及其可持续利用产生了巨大的压力和影响。加之长江、黄河和珠江三条大河将中国大陆人类活动的物质大量输入我国近海, 引起我国近海诸如富营养化、赤潮等一系列严重的环境污染和生态平衡问题, 研究我国近海生态环境变化的深层次机理已成为科学家必须要解决的重大科学问题。

海洋与湖泊生源要素的迁移转化是水体生物食物链过程最基础的组成部分, 一方面, 它直接决定了水域初级生产的规模与强度, 是决定水域生物资源可持续利用最关键的生态学过程之一, 所以, 生源要素的循环是实现海洋和湖泊生物资源可持续利用的基础。另一方面, 作为最主要生源要素的碳在海洋与湖泊中的行为以及由碳引导的生物泵过程又在一定程度上决定了全球及区域性气候的变化趋势, 所以, 生源要素的海洋学和湖泊学行为又是决定全球及区域性气候变化至关重要的因素。由此可见, 海洋及湖泊生源要素生物地球化学过程的研究既是海洋学和湖泊科学研究的国际前沿 (国际 IMBER 计划就是其重要例证), 也是我国近海典型海域和湖泊生态环境安全保障必须要面对和解决的科学问题。

本专著共分六章, 前四章分别阐述了中国近海典型海域 (长江口、胶州湾和南黄海等) 碳收支过程与北太平洋对人为碳的吸收模式, 后两章分别阐述了长江中下游典型湖泊 (太湖、东湖等) 的碳收支过程, 本书最大特点是所有的研究结论均是建立在大量调查数据的基础上, 并有诸多原始性的创新发现。

近海碳循环过程研究经过近 5 年的努力, 通过 15 个航次的外海调查, 初步揭示了中国近海碳源汇 (碳收支) 的强度; 定量评估了表层沉积物再悬浮过程对长江口及渤海碳垂直转移的影响; 揭示了长江河流碳源作用过程与沉积物生源要素在其生物地球化学循环中的功能; 阐明了黄海沉积物氮在其循环中的作用。主要的创新成果表现在: ①系统揭示了长江口的碳源过程及控制因素, 发现咸淡水混合及表层沉积物再悬浮分别是控制海水无机碳和有机碳源强度的主要因素; 东中国海在春季和冬季皆为大气 CO_2 的汇, 夏季皆为 CO_2 的源, 但以年度计仍是大气 CO_2 的净汇, 每年可吸收碳量为 1369 万 t。首次将沉积物中的无机碳分为不同的形态, 评估了它们对长江口及胶州湾碳循环的可能贡献, 发现了沉积物中盐酸相无机碳可长期被埋藏, 可能是大气 CO_2 的最终归宿。②初步阐明了海洋碳的垂直转移过程, 评估确定了浮游植物的固碳强度以及表层沉积物再悬浮对颗粒物垂直沉降的影响程度。东中国近海浮游植物年总固碳量可达 $222 \times 10^6 \text{ t}$, 约为东中国近海通过海-气界面总表观碳汇强度的 16.2 倍; 在长江口海域, 丰水期表层沉积物再悬浮比平均值为 65.6%, 底层再悬浮比平均值为 89.4%, 海水由于海-气交换得到的 CO_2 仅有 13.0% 以颗粒有机碳的形式垂直转移而形成表层沉积物中的有机碳; 在渤海, 表层沉积物再悬浮所占比例在 62%~82%。表层沉积物再悬浮对碳的垂直转移影响巨大。③首次定量研究了中国近海典型海域沉积物中碳、氮、磷和硅的形态及其在循环中的作用。在渤海, 表层沉积物中的氮、磷和硅仅有 26.5%、10.7% 和 0.05% 可潜在参与循环, 发现沉积物中氮、磷、有机碳、硅的分解速率依次降低。在黄海, 首次获得了沉积物中不同形态氮的粒度结构, 发现粗粒度沉积物中氮的分解速率远高于细

颗粒沉积物,提出了硅在沉积物中积累是造成胶州湾浮游植物生长硅限制的主要原因的新论点。

在海洋碳循环模式研究上,将北太平洋海盆尺度环流模式改造成开边界模式,模拟 CFCs 的分布和吸收,并使用该开边界模式进一步研究人为 CO_2 在北太平洋的吸收和分布,被动示踪物的检验,获得人为碳的模拟结果,分析了开边界对人为 CO_2 吸收的影响。 $20^\circ\sim 30^\circ\text{N}$ 海区是北太平洋人为 CO_2 的重要存储区。南边界条件对赤道海区人为 CO_2 吸收和储存影响最大,在赤道海区开边界模式相比闭边界模式吸收人为 CO_2 增多,但是水体人为 CO_2 储存量却减少很多。开边界模式 GMob0 和 GMob2 分别得到北太平洋在 1800~1997 年的 198 年里共吸收了人为 CO_2 约 23.75Gt C 和 24.67Gt C,其中约 75% 是由 40°N 以南海区吸收的,1997 年北太平洋水体总人为 CO_2 分别为 17.4 Gt C (GMob0) 和 18.2 (GMob2) Gt C。吸收量要远远大于储存量,这是因为在开边界模式中有部分吸收的人为 CO_2 通过南边界输送出了模式海洋。根据计算得到 1980~1989 年 10 年间北太平洋平均每年吸收人为 CO_2 0.370Gt C (GMob0) 和 0.386Gt C (GMob2),按全球海洋每年吸收 2.0Gt C 算,北太平洋占全球海洋吸收量的 19%。

对太湖的关键碳收支过程进行的研究发现,太湖水体的碳量主要受到出入河流的影响,与初级生产力的关系不大;草藻过渡型湖区的湖心区为大气甲烷的汇,水生植被、风速、风向、Chl a、天气状况等对水-气界面碳通量具有重要的影响;在一个年度内,太湖由流域输入的溶解性无机碳、无机碳量分别为 21.51 万 t 和 6.67 万 t,输出太湖的溶解性无机碳、无机碳量分别为 12.99 万 t 和 4.92 万 t,净滞留在太湖的无机碳和有机碳量分别为 8.51 万 t 和 1.76 万 t。沉积物向水体释放的有机碳 6192t,一年内流域、沉积物等向水体净输入碳总量为 10.9 万 t。由水-气界面进入大气的 CO_2 量在冬、春、夏、秋分别为 59390t、64762t、33708t、163518t,折合碳 8.765 万 t。藻型湖区、草型湖区、草藻过渡型湖区水-气界面年排放 CH_4 总量为 1742t、20691t、4265t,折合碳 2.0 万 t。

对武汉东湖碳收支的研究发现,在周年尺度上其是 CH_4 和 CO_2 的源, CH_4 四季皆向大气释放,释放量与温度和初级生产力正相关, CO_2 源汇的季节差异明显,与温度和初级生产力成负相关;东湖碳循环主要是由初级生产者为主的生物因子驱动,东湖具有高的碳、氮、磷含量与循环速度,春夏季浮游植物光合作用吸收的碳超过沉积物中 CH_4 和 CO_2 释放量,因此在生长季节表现为大气的弱碳汇,在周年尺度上湖泊水-气界面的碳源强度主要取决于冬季的 CO_2 释放量。东湖生物碳 (BOC) 高于其他北方湖泊,碳的沉积达碳收入的 60% 以上,水-气界面碳释放所占的比例低,所以,就流域尺度而言,湖泊总体上仍然是流域重要的碳库和有机碳汇集、代谢和沉积场所。对扁担塘的研究发现,其大型沉水植物对于湖泊 CH_4 通量具有重要影响,大型沉水植物占优势湖区的温室气体释放显著低于浮游植物占优势的湖区,显示大型水生植物在削减碳源上的积极作用。同时表明湖泊富营养化导致的水生植物的退化会加剧碳的释放,导致湖泊成为更大的大气碳源。

本专著是集体智慧的结晶,四个课题先后有近 50 位科学家参与,参与专著编撰的

有近 20 位，其主要编著者具体分工为：

第一章 宋金明 李学刚

第二章 宋金明 高学鲁 袁华茂 李宁

第三章 宋金明 李学刚 吕晓霞

第四章 徐永福 游小宝 李荣凤

第五章 胡维平 范成新

第六章 倪乐意 邢阳平 杨洪 吴爱平

全书由宋金明统稿定稿。

本专著的完成是四个课题近 50 位科学家努力的结果，没有他们在海上和野外冒着狂风暴雨不顾生死安危进行样品的采集和观测，没有他们在实验室不分昼夜高质量的样品分析，没有他们长时间专心致志地伏案写作，本专著也就不可能与读者见面，特别向参与课题研究的科学家表示诚挚的感谢！感谢项目首席科技专家黄耀研究员、于贵瑞研究员，是他们为课题的实施指点迷津，感谢项目领导小组特别是中国科学院资源环境科学与技术局（简称中国科学院资环局）陈泮勤研究员的指导与帮助，感谢项目办公室的蔡晓红女士、张雪洁女士 5 年来的辛勤劳动，同时感谢科学出版社的编辑们为本专著的出版付出的辛劳。

从某种意义上来说，本专著作为一部全新立意的著作，无论从研究思路的设计还是研究结果的分析，再到著者的写作等方面，都会存在不足乃至错误，恳请读者批评指正。

宋金明

2006 年 10 月于青岛汇泉湾畔

中国科学院知识创新工程重大项目

“中国陆地和近海生态系统碳收支研究” (KZCX1-SW-01)

资助

目 录

序一

序二

前言

第一章 海洋碳循环过程的研究概况	1
第一节 近海碳生物地球化学循环过程研究概况	1
一、全球变化与海洋碳循环	1
二、海洋碳的存在形态及迁移转化	3
三、海-气界面碳的交换与海洋碳源汇	6
四、近海生态系统对全球碳循环的贡献	9
五、中国近海碳循环过程研究的主要进展及分析	10
第二节 海洋碳的迁移转化与主要化学驱动因子的相互关系	18
一、营养盐的水平与变化对海洋中碳迁移转化的影响	18
二、海水酸碱度与海洋碳迁移转化的关系	21
三、氧化还原环境对碳迁移转化的控制作用	23
第三节 海水颗粒有机碳变化的生物地球化学机制	27
一、海水中 POC 的地球化学特征	28
二、POC 与生物过程的关系	32
三、POC 与营养盐的耦合关系	35
第四节 海洋碳的分析测定方法	38
一、海水溶解无机碳的简易测定方法	38
二、海洋沉积物中不同结合态无机碳的测定	44
第五节 近海碳收支过程研究的样品采集	49
一、长江口枯水与丰水季节样品的采集与分析	49
二、南黄海综合调查与北黄海沉积物样品的获得	52
三、胶州湾碳收支研究航次	54
参考文献	56
第二章 中国近海海水碳收支的生物地球化学过程	63
第一节 中国近海典型海域海水无机碳体系的地球化学特征	64
一、长江口海域海水溶解无机碳	64
二、南黄海海水溶解无机碳体系	85
三、胶州湾海水溶解无机碳体系	98
第二节 中国近海海-气界面碳通量	102
一、长江口海域海-气界面碳通量	102

二、南黄海海-气界面碳通量	108
三、胶州湾海-气界面碳通量的月际变化	110
四、渤、黄、东海海-气界面碳通量	113
第三节 影响与控制海水无机碳体系与碳源汇强度的生物地球化学因素	120
一、影响长江口海域的水文、化学及生物因素	120
二、影响南黄海海域海水溶解无机碳与碳源汇强度因素的分析	158
三、胶州湾海水溶解无机碳与碳源汇强度的控制体系	162
第四节 长江口海域有机碳的分布、来源及其影响因素	163
一、长江口水体有机碳的分布特征	164
二、长江口有机碳的来源及影响因素	170
三、有机碳与颗粒有机氮、磷及浮游生物的关系	177
第五节 长江口海域表层沉积物的再悬浮及对 POC 垂直沉降的影响	191
一、长江口海域海水中的 POC	191
二、颗粒有机碳垂直转移量的估算方法	198
三、东海丰水期表层沉积物的再悬浮及其对 POC 垂直通量的影响	202
第六节 南黄海溶解有机碳 (DOC) 的生物地球化学特征	206
一、秋冬季节 DOC 的地球化学分布特征及控制因素分析	206
二、DOC 与浮游生物、水文结构和化学耗氧量 (COD) 的关系	212
三、DOC 变化趋势分析	216
参考文献	219
第三章 中国近海沉积物中的无机碳及氮、磷、硅在其生物地球化学循环中的作用	227
第一节 长江口海域沉积物中的无机碳	227
一、长江口海域沉积物中不同形态的无机碳	228
二、影响长江口海域沉积物中不同形态无机碳因素的分析	247
三、不同形态无机碳的相互转化及其在碳循环中的贡献	259
第二节 胶州湾沉积物中的无机碳	273
一、胶州湾海域沉积物中不同形态的无机碳	273
二、影响胶州湾海域沉积物中不同形态无机碳因素的分析	276
三、沉积物中不同形态无机碳的关系	279
第三节 胶州湾沉积物中氮、磷、硅的生物地球化学特征	283
一、胶州湾沉积物中高含量的生源硅与浮游植物生长硅限制的关系	283
二、胶州湾沉积物中氮、磷来源的分析	288
第四节 黄海沉积物中氮、磷对其生物地球化学循环的贡献	296
一、南黄海表层沉积物中氮的粒度结构	296
二、南黄海表层沉积物中的氮对氮循环潜在贡献的分析	312
三、南黄海沉积物中氮、磷的来源	324
四、北黄海柱状沉积物氮的地球化学特征	332

参考文献	342
第四章 中国近海环流与北太平洋对人为碳的吸收	347
第一节 中国近海环流模式	347
一、概述	347
二、中国近海环流模式介绍	350
三、中国近海环流数值模拟	359
四、中国近海资料同化	378
第二节 北太平洋对人为碳的吸收	390
一、概述	390
二、模式描述	392
三、模拟结果	396
参考文献	416
第五章 太湖的碳收支过程	424
第一节 太湖水-气界面碳交换特征	424
一、太湖的自然地理概况	424
二、太湖水-气界面 CO_2 与 CH_4 通量日变化特征	427
三、 CO_2 通量年变化	434
四、 CH_4 与 CO_2 通量的影响因素分析	438
第二节 太湖水体碳的形态与时空变化特征	449
一、太湖水体碳的储存形态	449
二、太湖水体碳的水平分布	451
三、太湖水体碳的垂直变化	460
四、太湖水体碳的时间变化	463
第三节 太湖沉积物有机碳的时空变化与沉积物-水界面交换	470
一、太湖沉积物有机碳的时空变化特征	470
二、太湖碳的沉积速率	479
三、沉积物-水界面碳的交换	481
第四节 太湖的水陆碳交换与碳收支	487
一、太湖水陆碳交换	487
二、太湖碳的收支	489
参考文献	493
第六章 武汉东湖的碳收支过程	494
第一节 研究概述	494
一、湖泊碳循环研究的基本情况	494
二、湖泊碳的形态、碳库以及碳循环特点	495
三、本研究的特点	497
四、所研究的典型长江中下游湖泊的自然地理概况	498
五、长江中下游湖水碳与氮、磷的比较	501

第二节 东湖与保安湖扁担塘的水-气界面碳通量	504
一、东湖水-气界面的碳通量	504
二、保安湖扁担塘沉水植被对水-气界面碳通量的影响	514
第三节 东湖的沉积物碳库、碳收支及长江中下游湖水碳与氮、磷的关系	521
一、武汉东湖沉积物中的碳	521
二、东湖碳收支的估算	524
三、长江中下游湖水中的碳、氮与磷的关系	525
参考文献	528