



地球观测与导航技术丛书

中国碳同化系统 及其应用研究

陈报章 张慧芳 著



科学出版社



地球观测与导航技术丛书

中国碳同化系统及其应用研究

陈报章 张慧芳 著

中国科学院科技先导专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之专题
“基于GCM模式的全球同化系统研究”（XDA05040403）

国家高新技术研究发展计划（863计划）项目“基于碳卫星的遥感定量
监测应用技术研究”（2013AA122000）之课题“多源碳观测数据融合与
同化技术研究”（2013AA122002）

联合资助出版

江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心建设项目
江苏省老工业基地协同创新中心建设项目

科学出版社
北京

内 容 简 介

数据同化技术是一种观测数据和模型集成的数据处理技术,是目前地球系统科学界的热点和前沿。本书从模型数据输入、参数化、数据同化理论和方法等几个方面,详细阐述大气 CO₂ 同化反演系统的原理、构成和实现步骤,进而通过具体实例,详细讨论了几种同化算法、实验步骤,并分析、评价了其反演结果,最后提出目前中国碳同化系统的不足和发展方向。

本书旨在为从事大气 CO₂ 数据同化研究的工作者提供入门参考和思路借鉴。同时,也适合陆面同化、全球环境变化及地球系统科学等领域的科研工作者以及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国碳同化系统及其应用研究/陈报章,张慧芳著. —北京:科学出版社, 2015. 11

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-046161-2

I. ①中… II. ①陈… ②张… III. ①遥感技术-应用-二氧化碳-大气监测-研究-中国 IV. ①X831-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 260156 号

责任编辑:杨帅英 / 责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴 / 封面设计:王 浩

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

*

2015 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:342 000

定价:89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江碧涛	江 凯	景 宁
景贵飞	李传荣	李加洪	李 京	李 明
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	闫国年	孟 波
秦其明	单 杰	施 闯	史文中	吴一戎
徐祥德	许健民	尤 政	郁文贤	张继贤
张良培	周国清	周启鸣		

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段,而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑,地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项;国家有关部门高度重视这一领域的发展,国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展;工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范;国家高技术研究发展计划(863 计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题,首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前,“十一五”计划正在积极向前推进,“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下,把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书,集中发布,以整体面貌推出,当具有重要意义。它既能展示 973 计划和 863 计划主题的丰硕成果,又能促进领域内相关成果传播和交流,并指导未来学科的发展,同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展,科学出版社依托有关的知名专家支持,凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验,主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 计划相关项目以及其他国家重大相关项目,或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结,或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信,通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作,将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世,成为我国地球空间信息科学中的一个亮点,以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展!

李德仁

2009 年 10 月

序 一

全球气候变化问题是 21 世纪人类社会面临的最严峻挑战之一。自工业革命以来,人类活动引起大气 CO_2 浓度持续升高,改变了全球生态系统的碳循环过程与碳收支平衡,导致全球气候变暖,引发一系列严重的全球变化问题,给人类自身的生存和可持续发展带来巨大的威胁。面对全球变化给人类带来的巨大挑战,三大国际组织(IGBP、IHDP、WCRP)联合提出了碳集成研究计划,旨在回答“全球碳源/汇的时空格局如何?由何种因素导致?决定未来碳循环动态的控制与反馈机制是什么?未来全球碳循环的可能动态如何?”等科学问题。这一研究计划促使碳循环研究工作成为全球变化科学中的研究重点之一。

碳循环研究工作始于 20 世纪 70 年代,发展于 80 年代,在 90 年代末至 21 世纪初进入高速发展时期。随着碳循环研究的开展,碳源/汇研究方法也得到了发展。目前,有多种方法用于碳源/汇研究中,主要可分为两种:以陆地生态系统为对象的“自下而上”(bottom-up)方法和以大气为对象的“自上而下”(top-down)方法。“自下而上”法又可以分为箱式通量观测法、生态样方调查、普查资料(森林、草原、农业生态系统等)分析、涡度相关通量塔观测、土地利用和土地覆被变化监测法以及生态系统模型模拟等关注不同尺度的不同方法。碳同化系统是一种“自上而下”的碳源/汇估算方法,它利用测定的大气 CO_2 浓度,结合大气传输模型和数据同化技术,获得全球或区域碳源/汇估测值。该方法被广泛用于估测陆-气净 CO_2 交换量,已成为国家和区域尺度上碳循环研究的重要手段。

经过多年的发展,碳同化系统已得到了长足的发展。随着碳同化框架的发展,大气碳同化反演系统不再局限于只能模拟大空间范围的、粗分辨率的碳通量,而同化方法的改进则大大提高了碳同化系统的精度和效率。目前的碳同化系统能够高效地模拟出格网尺度和周步长的全球碳源/汇时空分布。新的观测手段(碳卫星遥感技术)的出现,则改变了碳同化系统只能利用“有限的站点观测数据去估测全球碳通量”的缺陷,使其成为当前国际上流行的陆地生态系统碳源/汇估测工具之一。

在碳同化系统快速发展过程中,我们迫切需要相关书籍介绍最新的研究状况。中国科学院地理科学与资源研究所的陈报章研究员在这种形势下,接受科学出版社约稿,与张慧芳博士等合作,开展了《中国碳同化系统及其应用研究》一书的编撰工作。

该书从碳同化系统的原理、框架构成、数据同化方法、参数率定方案、结果验证、不确定性分析及应用实例分析等方面,系统地讨论了全球碳同化系统的构建及其应用等相关内容,并指出目前全球碳同化系统存在的不足和未来发展方向。该书还通过全球碳同化系统在中国陆地生态系统的应用案例,讨论了过去 2000~2010 年中国陆地生态系统碳源/汇的时空演变过程、特征及其归因。最后以 GOSAT 碳卫星为例,介绍了基于碳卫星-地基多源观测数据的联合碳同化系统及其在中国区域的应用。经过科学出版社严格地筛选,该书被纳入该社的《地球观测与导航技术丛书》。该书是在国家高新技术研究发展计划(863 计划)“基于碳卫星的遥感定量监测应用技术研究”项目之课题“多源碳观测数据融合与同化技术研究”(2013AA122002)、中国科学院科技先导专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之专题“基于 GCM 模式的全球同化系统研究”(XDA05040403)和国家自然科学基金项目(41071059,41271116)的资助下获得的高水平原创性成果的总结。相信该书的面世,将成为我国碳循环研究中的一个亮点并将大大推动全球地基-卫星联合碳同化系统的发展及其在我国的应用。

该书作者陈报章研究员自 2009 年 6 月入选中国科学院海外杰出人才类“百人计划”回到中国科学院地理科学与资源研究所工作开始,积极组建、培养中国数据-模型同化研究团队,经过 5 年的艰苦努力,研发出我国首个高时空分辨率碳同化反演系统——中科院碳追踪同化系统(中国碳追踪器)。该书是对这一成果的总结。相信该书对于从事大气 CO₂ 数据同化研究的工作者是一部难得的参考书和工具书。同时,该书也适合陆面过程模型同化、全球环境变化及地球系统科学等领域的科研工作者以及高等院校师生参考、学习。该书的出版将促进大气、数学、遥感、气候、生态、计算机等学科的交叉与融合,推动全球变化科学的发展。

中国科学院院士 周成虎

2015 年 8 月

序 二

数据同化技术已发展了几十年。从如何解决只能使用很少计算资源来完成快速行驶火箭的导航任务这一貌似简单的挑战开始,数据同化技术发展至今,其魅力已在许多学科中得到了显现。之所以水文和气象学科研究人员成为数据同化技术的开拓者和较早的使用者,这可能是因为利用不断增加的观测数据来优化变量分析和预测过程的同化概念与水文和气象学的系统理念十分吻合。那些与气象和水文密切相关的“新”学科也很快开始了应用数据同化技术且体会到该技术的强大功能。今天,致力于研究大气与陆地或海洋表面之间水分、能量、气体或物质交互的学者也纷纷体会到或看到数据同化技术给他们的研究所带来的好处。当然大气碳循环研究领域也不例外,在过去十余年,该领域以某种方式依赖数据同化技术所开展的研究实例的数量在迅速扩大。

大气碳循环研究的一个重要分支就是利用数据同化技术、 CO_2 浓度观测记录,测算陆表碳通量及其变化。陆表碳通量不仅是随时间变化的,而且其空间分布格局具有复杂的空间变异性。对陆表碳通量幅度和时空变化格局的了解,将有利于洞察正在进行和未来即将发生的大气与陆表之间的碳交换规律。因此,碳循环同化研究领域的主要兴趣点在于如何利用数据同化技术对碳循环的状态做回顾性诊断分析,而不是做预测预报,这正是碳循环数据同化领域区别于许多其他数据同化领域的关键之处。

同其他学科一样,在发展初期阶段,大气碳同化研究领域一些术语的意义尚未完全统一起来。例如,一个流行的术语“数据-模型融合”,其语义涵盖了融合系统中的所有相关的算法。在碳同化系统中, CO_2 浓度观测数据不仅用来初始化模型,而且作为动态变量或参数被应用到模型的运行和求解过程中;另一个术语“反演”,通常指贝叶斯最小平方框架中的格林函数方法, CO_2 通量是作为大气边界条件被估算求解的,因此求解过程并不涉及时间步进算法。“数据同化”这个词类似“反演”,用以解决贝叶斯最小二乘边界条件问题,但不同于反演系统,“数据同化”系统是随时间而步进(变分、过滤器或平滑技术)的。

数据同化技术在 20 世纪 80 年代末期至 90 年代初期被引入碳循环领域。人们最早利用这种同化技术对碳循环进行“大气传输反演”研究。在反演研究中,大气传输模型被用来建立地球表面 CO_2 通量与观测的大气 CO_2 浓度(或更准确称之为大气 CO_2

摩尔数比率)之间的线性关系。而受 CO_2 观测网络密度的限制,数据同化系统只能对有限数量未知区的碳汇量进行优化,因而早期所开展的研究主要集中在反演北半球区域年均碳汇总量及其空间分布。由于在发展初期,不同的模型所估算的碳汇强度存在较大的变化范围(即存在较大的不确定性),因此很快触发并进一步推进了国际模式比较项目的发展,如 TRANSCOM,这有助于培养一个非常开放且协同创新的科学共同体。

进入 21 世纪后, CO_2 观测网络快速扩展,碳循环数据同化方法也到了迅速发展。与其他数据同化领域一样,随着伴随矩阵变分最小化方案的编程实现,首个卡尔曼平滑系统被引入了碳同化反演研究领域。这样, CO_2 浓度观测值和状态变量间的同化处理计算过程可以在一个普通的 PC 机上完成,可见反演所需的计算资源等问题没有真正成为其发展应用的障碍。同时,不同于传统的碳反演法,该系统采用全协方差矩阵来评估所反演的多年碳汇值的不确定性。这种方法是在为即将召开的国际 CO_2 会议而做准备的紧迫时间下完成的,而且我认识到这种不确定性估测方法能更有效地捕捉到集成方法的误差,至此,我们已经建立并测试了首个基于集合卡尔曼平滑算法的 CO_2 同化系统,该系统采用当时流行的方法,即通过先验传输矩阵对状态变量进行取样,能够估算出时间分辨率不超过 10 天时间的陆地碳汇值。

这个碳同化系统被命名为“碳追踪器(CarbonTracker)”,其构建于 2004 年,于 2005 年在美国召开的第六届国际 CO_2 会议上首次发表。该系统及其反演结果随后公布于以提供开放数据共享而著名的具有悠久历史的美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下属的地球系统研究实验室(ESRL)网站上。其结果很快变成了向社会开放的一套碳通量产品,人们只要简单点击 NOAA-ESRL 网站的“碳追踪器”网页就能方便地下载该产品。“碳追踪器”产品早期的成功及下载者对它的积极反应触发了我们对这个开放数据产品的承诺,即提供这些产品的年度更新。此外,我们决定对“碳追踪器”基础源代码开放。令我们惊奇的是,源代码的下载有时会超过任何其他产品。在很短的时间内,来自世界各地的诸如技术支持、更详细文档和合作的要求络绎不绝。

世界上有几个研究团队较早开始使用“碳追踪器”系统,并且根据所关注(重点研究)的地理区域的不同对该系统进行重命名,例如,欧洲碳追踪器(CarbonTracker-Europe)、巴西碳追踪器(CarbonTracker-Brazil)、亚洲碳追踪器-亚洲(CarbonTracker-Asia)和北极圈碳追踪器(CarbonTracker-Arctic)。大气传输模型 TM5 是“碳追踪器”系统的一个至关重要的组成部分。这些不同关注区域的“碳追踪器”系统,除了增加来自所重点关注的研究区额外的观测数据集外,还时常切换“碳追踪器”系统中大气传输模型 TM5 的重点嵌套区,以实现对所关注的不同重点研究区域的高空间分辨率的碳源/汇估算。而且,因为这些合作者在 CarbonTracker 系统中引入了来自他们所关注

区域的、通常尚未公开使用的、新的观测资料使碳同化结果更加准确。这也是我们向国际同行传递一个重要信息:数据同化系统严重地依赖于精心收集的、经过严格质量控制的共享观测资料。CarbonTracker 研发团队十分支持本地的实验研究,并鼓励合作者把这些实验加入到“碳追踪器”研究中,允许合作发表学术论文,且始终承认他们的贡献。

随着“碳追踪器”数据和代码向公众的开放,人们用批判眼光对它的一些基本假设和代码进行了讨论和分析。处于初始发展阶段的“碳追踪器”存在弱点,例如由于对净生态系统碳交换量(NEE)的估算采用了简单的线性比例系数的假设,因此有时会把应为碳汇的净生态系统碳交换量翻转为碳源。这一弱点又被渴望对“碳追踪器”作出贡献的学员们突然放大。这也导致“碳追踪器”系统的重大改革和新的“碳追踪器的数据同化系统(CTDAS)”问世。CTDAS 是用读取简单、可扩展性强的 Python 来实现的。它的易用性允许使用者配置不同的本地化模式对系统进行新的评估、测试,并在不同的(超级)计算平台上进行并行化。对我本人而言,这些努力,以及许多讨论使“碳追踪器”项目更加丰富、有趣。看到新一代碳循环数据同化专家使用和发展这个系统,这是多么令人满足和高兴的一件事啊!

这本书展示了我领导的荷兰瓦格宁根大学团队与中国科学院陈报章研究员领导的团队共同努力所取得的成果。这两个团队精诚合作、历经五年的共同努力,我们共同建立了“中国碳追踪器(CarbonTracker-China)”。我们的合作是富有成效的,发表了一批经同行评审的学术论文,在模型比较和碳循环综合分析方面取得了很好的成果,促进了碳循环同化反演研究的发展。我向将要从事碳同化研究的博士和博士后们高度推荐这本书。这本书会带着你跟随作者的脚步去体会他们快速学习碳同化系统的历程。更重要的是,我希望新学员能够通过这部书的阅读和学习,成长为数据同化方面的专家,希望有一天你们能找到适合你们自己的发展之路并加入到我们这个不断成长的“碳追踪器”的大家庭中来。

荷兰瓦格宁根大学气象学系

沃特·彼得斯教授 撰写于 2015 年 6 月

本书著者中国科学院地理科学与资源研究所陈报章研究员翻译

附：荷兰瓦格宁根大学气象系 Wouter Peters 教授为本书作序二的原文

The field of data assimilation is by now several decades old. Starting from the ‘simple’ challenge of navigating fast traveling rockets with a minimal amount of computing capacity, the elegance of data assimilation methods have been rediscovered in many disciplines since. Hydrology and meteorology researchers were among the early adopters, possibly because the concept of consecutive analyses and forecasts that refine with increasing observational constraints fits well to their systems. It is not surprising that ‘new’ disciplines that were closely related to meteorology and hydrology were keen to harness the power of data assimilation techniques as well. Nowadays, any researcher studying the exchange of water, energy, gases, or matter between the atmosphere and land- or ocean surfaces has likely used, or seen the use of, such methods in their field. The realm of atmospheric carbon cycle research is no exception to that, and the number of studies that rely in some way on data assimilation has expanded rapidly in the past decade.

The main interest in this particular branch of data assimilation is to find carbon dioxide surface fluxes that agree with the atmospheric carbon dioxide records of the past decades. These surface fluxes are time-varying and have detailed spatial patterns, and knowing their magnitude and variations could lead to new insights on ongoing and future changes of carbon dioxide exchange between the atmosphere and surface. We are therefore primarily interested in the retrospective analysis of the state of the carbon cycle, and not so much in its forecast, which sets this field aside from many other fields of data assimilation.

As in all scientific fields, different words have attained different meaning in a short amount of time in the field of atmospheric carbon cycle research. The popular term “model-data fusion” encompasses any methodology where carbon dioxide observations are used to inform on a model initial state, dynamic variable, or parameter. “Inversion” usually refers to a Green’s function approach in a Bayesian minimum-least squares framework where carbon dioxide fluxes are estimated as boundary conditions for the atmosphere, and no time-stepping is employed. The word “data assimilation” is often reserved for systems that solve the same Bayesian least-squares

boundary condition problem, but a time-stepping algorithm (variational, filter, or smoother techniques) is used.

Some of the earliest adoptions of these techniques were the “atmospheric transport inversions” that entered the field in the late 1980’s and early 1990’s. Atmospheric transport models were used to establish the linear relationship between carbon dioxide exchange at the Earth’s surface and the observed mixing ratios, or more properly mole fractions, of carbon dioxide in the atmosphere. The density of the observing network for CO₂ only allowed a limited number of unknowns to be optimized, and the interest of the analysis was mostly to estimate the location and magnitude of the annual mean northern hemispheric carbon sink. The initial wide range of estimates quickly gave rise to model inter comparison programs such as TRANSCOM, which helped to foster a very open and collaborative science community.

The expansion of the observing network for CO₂ since the early 2000’s caused a diversification of methods. Like in any data assimilation field, adjoint codes made their entry allowing variational minimizations, and shortly afterwards the first Kalman smoother systems were introduced. The size of the inverse problems did not necessitate this really, as observation and statevector sizes still could be handled on a simple PC. Rather, it was the need for full covariance matrices to assess multiyear uncertainties that made this problem outgrow the traditional method. The realization that this uncertainty was much more efficiently captured in an ensemble approach came to me under time pressure to complete a large flux estimate before an upcoming meeting. The first ensemble Kalman smoother for CO₂ was built, tested, and presented in a time span of no more than 10 days, and actually still used the precalculated transport matrices that were so popular at that time to sample the statevector.

This ensemble system was originally developed in late 2004 and its first results were presented at the 6th International Carbon Dioxide Conference in the USA in 2005. Coming from the NOAA Earth System Research Laboratory with its long history of open data-sharing, its results were quickly turned into products available to the community through a simple website under the name “CarbonTracker”. The early success and positive responses to this open data policy triggered our promise to provide yearly updates of these products. Moreover, we decided to give full access to its underlying source code. To our surprise, the downloads of the source code some-

times exceeded any other product available. And within a short amount of time, requests started to come in from around the world for technical support, more detailed documentation, and collaboration.

The CarbonTracker system made its way to several other groups and named after their geographical focus such as Europe, Brazil, Asia, and the Arctic. In addition to assimilating extra datasets from these areas, these systems often switched the nested-grid definition of the underlying TM5 atmospheric transport model, a vital component of CarbonTracker. Moreover, these groups introduced new observations often not yet available in the public domain, giving new excitement to their studies. This was a great chance for us to spread an important message to the community: data assimilation relies critically on carefully collected, quality controlled, and collaboratively shared observations. Support your local experimentalists, involve them in your studies, offer co-authorships, and always acknowledge their contribution. I am happy to see many groups take this to heart.

With the proliferation of the CarbonTracker system to other groups, fresh eyes critically looked at some of its underlying assumptions and code. Weaknesses in the system present since its inception, such as for instance the linear scalar multipliers that can flip the sign of NEE when they go negative, were suddenly magnified by students eager to contribute. This led to a major overhaul of the system and the new “CarbonTracker Data Assimilation System (CTDAS)” was born. It was based on simple to read and expandable source code in python. Its ease-of-use allowed different localization schemes to be assessed, new statistical tests written, and parallelization on different (super)computing platforms. These efforts, and the many discussions that ensued from them, have made the CarbonTracker program richer and much more fun for me. It is immensely satisfying to see a new generation of carbon cycle data assimilation specialists adopt the system.

This book describes the joint efforts we had with the Chinese Academy of Sciences group of Prof Baozhang Chen over the past five years. Together, we built “CarbonTracker China”. This collaboration was particularly fruitful and led to a number of well-read and peer-reviewed publications, a PhD defense, and numerous contributions to model inter comparisons and carbon cycle syntheses. For the starting PhDs and PostDocs in the field, this book is highly recommended. Following in the

footsteps of its authors and seeing their rapid learning curve is educational. But most of all, I hope that new students will be inspired to become data assimilation specialists too, and perhaps one day find their way to the growing CarbonTracker family.

Prof. Dr. Wouter Peters

Air Quality

Environmental Sciences Group

Dept. of Meteorology

Wageningen University

&

Centre for Isotope Research

Energy and Sustainability Research Institute Groningen

Groningen University, The Netherlands

前言

人类活动引起的大气 CO_2 浓度升高所导致的全球气候变化,给人类自身的生存和发展带来了巨大威胁。在气候与环境问题日益突出的今天,作为全球碳循环重要环节的陆地生态系统碳源/汇,其分布格局、动态变化规律及驱动机制等方面的研究日益受到关注,多种不同的方法被开发出来用于陆地生态系统碳源/汇的估算研究。然而,陆地生态系统的复杂多样性、观测数据时空尺度和精度上的差异性,导致陆地生态系统碳源/汇估算结果存在着极大的不确定性。不同研究者估算出的全球陆地生态系统碳汇总量差异很大,变化范围为 $0.5 \sim 2.0 \text{ PgC/a}$,且估算的年际变化趋势也存在很大的差异。降低碳源/汇估算结果的不确定性,加强陆地生态系统碳源/汇估算方法的优化研究,提高陆地生态系统碳汇的估算精度,加强在不同尺度上,尤其是存在最大不确定性的区域尺度上,碳源/汇收支认证,已成为全球变化研究的热点之一。

现有的多种陆地生态系统碳源/汇估算方法,可归纳为以陆地为对象的“自下而上”(bottom-up)法和以大气为对象的“自上而下”(top-down)法两类。碳同化系统反演方法属于后者。

碳同化系统的两个重要组成部分是 CO_2 浓度观测数据和数据同化技术。近十几年来全球站点观测数据迅速积累(如地基观测网站 NOAA-ESRL, WDCGG)。同时, CO_2 遥感科学技术也在日新月异地快速发展。日本和美国相继成功发射了如 GOSAT 和 OCO-2 高精度 CO_2 探测卫星,可以提供全球覆盖范围、实时的大气 CO_2 柱浓度监测数据。另外,随着计算机科学和数值方法的发展,数据同化技术也得到了快速发展。随着碳同化技术的日臻完善,碳同化系统得到了进一步的优化。目前大气 CO_2 同化反演方法已经成为全球和区域尺度碳源/汇估算的最重要的方法。

本书面向全球碳同化系统及其应用研究的发展前沿,系统地总结了作者所领导的课题组近年来在全球大气 CO_2 同化反演系统发展及其应用方面的研究成果,对全球大气 CO_2 同化反演系统的优化方法、代表性应用研究进行了较为系统的总结和介绍。全书注重原理、方法和实践的有机结合。本书涉及很多方面的内容,包括同化算法的选择、同化框架的设计、观测数据的筛选与误差处理、先验通量的估算等。要用很短的篇幅介绍碳同化系统的全貌是比较困难的,国内外也较少见此书籍。因此,本书的编写力图在前人工作的基础上,全面介绍碳同化系统的发展历程、数据同化方法、大气 CO_2 同化技术以及几种著名的同化系统及其应用研究,最后展望了未来大气 CO_2 同化系统的发展方向。

本书的章节安排如下:第1章绪论,概述全球变化研究与碳循环研究,以及CO₂同化系统的发展历程;第2章主要介绍常见的数据同化方法,包括变分方法、卡尔曼滤波算法、粒子滤波算法等;第3章介绍大气CO₂同化系统中的关键技术,包括系统框架、同化方案、关键参数设定与误差分析;第4章重点介绍碳同化系统CarbonTracker及其前身Transcom同化系统的技术细节;第5章主要介绍大气CO₂同化系统在中国区域的应用,包括模型的参数设定、数据准备以及不确定性分析,同时也对该系统所估算的2001~2010年中国陆地生态系统碳源/汇时空分布特征及其驱动机制进行了讨论;第6章详细介绍了中国地基-卫星联合同化系统,包括GOSAT碳卫星CO₂柱数据的评价、联合同化算法及案例研究等;第7章回顾全书内容,指出现有研究的不足,前瞻了碳同化系统未来的研究方向。

全书由陈报章确定编写大纲。中国科学院中国碳同化系统(CarbonTracker-China)研发团队的一线骨干研究人员和部分研究生参与了部分章节的撰写,包括张慧芳、许光、徐博轩、孙少波和林晓凤。全书由陈报章和张慧芳统稿。

本书的研究得到中国科学院科技先导专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之专题“基于GCM模式的全球同化系统研究”(XDA05040403)、国家高新技术研究发展计划(863计划)课题“多源碳观测数据融合与同化技术研究”(2013AA122002)、国家自然科学基金项目“中国涡度相关通量塔空间代表性评估与碳源汇尺度扩展研究”(41271116)和“景观和区域尺度陆地生态系统碳水耦合循环机理过程与固碳能力研究”(41071059)、中国科学院“百人计划”项目“景观和区域尺度CO₂源汇分布以及陆地生态系统碳氮循环耦合过程对气候变化的响应研究”(O9W90020ZZ)和国家全球变化研究专项之子课题“基于高塔CO₂浓度数据和遥感-模型同化的区域碳源汇研究”(2010CB950900)、中国科学院地理科学与资源研究所“一三五”战略科技计划项目(2012ZD010)和资源与环境信息系统国家重点实验室自主部署创新研究计划资助项目(O88RA900KA)、江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心建设项目和江苏省老工业基地协同创新中心建设项目以及国家全球变化研究专项之子课题“基于高塔CO₂浓度数据和遥感-模型同化的区域碳源汇研究”(2010CB950900)等的支持。在项目实施和专著写作过程中,得到中国科学院大气物理研究所吕达仁院士,中国科学院地理科学与资源研究所孙九林院士、周成虎院士、刘纪远研究员、葛全胜研究员、于贵瑞研究员、陆锋研究员、邵全琴研究员、岳天祥研究员、欧阳竹研究员、李发东研究员、王绍强研究员、姚一鸣高级工程师,中国科学院遥感与数字地球研究所施建成研究员,中国科学院大气物理研究所刘毅研究员、张美根研究员、田向军研究员,南京大学陈镜明教授、居为民教授、王体健教授、丁爱军教授、江飞副教授、王恒茂副教授,中国矿业大学汪云甲教授、张海荣副教授,北京师范大学戴永久教授、刘绍民教授,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所李新研究员的指导与帮助,在此对各位同事表示衷心的感谢。

在相关课题的实施过程中,作者与国际大气同化反演模型和碳循环领域的知名学

者包括荷兰瓦格宁根大学气象系 Wouter Peters 教授、法国原子能与可替代能源委员会、法国环境与气候科学实验室 (LSCE) Philippe Ciais 教授、美国国家海洋和大气管理局地球系统研究实验室 Pieter Tans 教授、加拿大英属哥伦比亚大学 T. Andrew Black 教授、Nicholas C Coops 教授、Andreas Christen 副教授开展了相关的合作研究和学术交流,本研究也得到了他们的支持。特别需要指出的是,本书的部分成果也受益于中荷双边科学合作项目 (scientific cooperation between China and the Netherlands) “Closing the carbon budget of the northern Hemisphere: CarbonTracker -China”, 在此对参与该项目的荷兰瓦格宁根大学 Ivar van der Velde 博士、Wouter Peters 教授研究团队成员表示衷心感谢。

本书部分成果已在国内外刊物发表。在本书撰写过程中,参考了国内外大量研究论文、优秀著作和相关网站资料,在此表示衷心感谢。虽然作者试图在参考文献中全部列出并在文中表明出处,但难免仍有疏漏之处,在此诚挚地希望得到同行专家的谅解与支持。

在编写此书时,力求做到深入浅出,通俗易懂,并尽量做到图文并茂。希望本书的出版能为从事相关领域的科研、教学和业务人员带来帮助。由于作者水平有限,编写时间匆忙,书中不足与不妥之处在所难免,在专著行将出版之时,著者诚惶诚恐,唯期待读者批评指正。关于本书内容的任何批评、意见和建议,请发至电子邮箱: baozhang.chen@igsnrr.ac.cn。

陈报章

2015 年 8 月