



An Introduction to  
Carbon Verification Systems

碳核查体系导论

徐冠华 顾 问

岳天祥 张丽丽 王鼎益  
赵明伟 王轶夫 张慧芳 编 著  
刘 羽 刘冬冬 陈报章



科学出版社

# 碳核查体系导论

An Introduction to Carbon Verification Systems

徐冠华 顾问

岳天祥 张丽丽 王鼎益  
赵明伟 王轶夫 张慧芳 编著  
刘 羽 刘冬冬 陈报章

资助项目：国家高技术研究发展计划项目（2013AA122003）  
国家自然科学基金创新研究群体项目（4142100101）



科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是 863 课题研究成果的提炼和充实,详细论述了 CO<sub>2</sub> 浓度反演算法、CO<sub>2</sub> 浓度空间插值模型、碳源汇数据融合和同化方法的基本原理以及模拟系统的构成和误差分析,概括了上述理论方法在中国碳卫星 (TanSat) 校飞实验和地面同步观测中的成功应用。同时,分析了 CO<sub>2</sub> 主动遥感相对于被动遥感的主要优势,提出了星-空-地一体化的碳核查体系概念框架。

本书可供地理信息学、生态信息学、环境信息学和遥感科学等领域的本科生、研究生和科研人员,以及从事控制大气 CO<sub>2</sub> 浓度国际谈判和 CO<sub>2</sub> 排放权交易的科技和管理工作者参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

碳核查体系导论 / 岳天祥等编著. —北京: 科学出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-03-054229-8

I. ①碳… II. ①岳… III. ①二氧化碳-废气排放量-污染控制  
IV. ①X511.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 204798 号

责任编辑: 文 杨 程雷星 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 迷底书装

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

\*

2017 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 10 月第一次印刷 印张: 17 3/4

字数: 421 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 《碳核查体系导论》学术指导委员会

指导委员会主席 卢乃锰

指导委员会副主席 方精云 李传荣 张国成

指导委员会成员 (按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 牛 铮 | 尹增山 | 田向军 | 刘纪远 |
| 刘晓群 | 刘 毅 | 江 凯 | 江碧涛 |
| 苏奋振 | 李增元 | 杨忠东 | 郑玉权 |
| 柳钦火 | 骆亦其 | 徐 冰 | 唐新明 |
| 彭 凯 | 葛全胜 | 董瑶海 | 舒 嵘 |
| 曾 澜 | 樊士伟 |     |     |

学术委员会主席 方精云

学术委员会成员 (按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 马贺平 | 王舒鹏 | 韦志刚 | 文小航 |
| 刘正军 | 刘 伟 | 刘琪璟 | 余 涛 |
| 吴 迪 | 张承明 | 张绍良 | 张莲蓬 |
| 张淳民 | 周寅康 | 胡嘉聪 | 侯湖平 |
| 袁文平 | 徐胜华 | 黄华兵 | 黄庚华 |
| 储美华 | 廉培勇 | 蔺 超 | 虢建宏 |
| 魏 信 |     |     |     |

## 序

过去 20 多年来,国际科学界对全球变化研究不断深化,逐步形成了人类活动产生的碳排放是全球变暖重要驱动力的共识。然而,碳储量和二氧化碳排放估算有很大的不确定性。人们期望通过碳卫星监测全球二氧化碳时空变化,减小碳源汇估算的不确定性。2016 年 12 月,我国成功发射了碳卫星 (TanSat)。

为了保证我国碳卫星成功发射和高效利用、探索支持控制大气  $\text{CO}_2$  浓度国际谈判和  $\text{CO}_2$  排放权交易的新技术和新方法,我国国家高技术研究发展计划 (863 计划) 支持开展了“碳核查遥感技术体系研究”课题研究。

《碳核查体系导论》一书提炼和总结了“碳核查遥感技术体系研究”课题的研究成果。主要内容包括:①二氧化碳浓度反演系统的基本思路和反演算法原理;②二氧化碳柱浓度残缺曲面的空缺填补和二氧化碳柱浓度散点数据空间插值方法;③卫星遥感数据、地面观测数据和模型输出的碳源汇数据融合方法及误差分析;④大气二氧化碳和碳储量数据同化系统的构建、关键参数和误差分析方法;⑤中国碳卫星 (TanSat) 校飞实验和地面同步观测以及校飞区二氧化碳浓度模拟分析;⑥二氧化碳主动遥感与被动遥感的优势和劣势比较分析及对策。

《碳核查体系导论》是“地表碳核查技术规程”的理论和方法支撑。“地表碳核查技术规程”可为确保碳核查结果的准确性和一致性,为不同地区、省市之间的碳交易提供技术标准依据。

在未来短期内,确定发射的有关卫星包括日本的 GOSAT-2、美国的 OCO-3、日本的 GOSAT-3、法国与英国合作的 MicroCarb、欧洲空间局的 Copernicus 计划/地球探索者 8 号、加拿大的 HEO (highly elliptical orbit) 和美国的 GeoCarb。

日本 GOSAT-2 计划在 2018 年 10 月发射,主要目的是提高 GOSAT 二氧化碳浓度、甲烷和生物量的观测精度。美国 OCO-3 计划在 2018 年 10 月发射,观测方法与 OCO-2 相同,计划在全球进行一定密度的地表采样,主要目标是將二氧化碳浓度和生物量观测的不确定性较 OCO-2 降低 40%。

法国与英国合作,计划在2020年发射 MicroCarb,主要观测二氧化碳浓度、水分和生物量,绘制全球碳源和碳汇地图。加拿大希望在2020年发射 HEO 卫星,主要观测北极和北方森林地区(北纬 $50^{\circ}$ ~北纬 $90^{\circ}$ )的碳源和碳汇,它将使二氧化碳通量的不确定性在这一地区较 GOSAT 平均降低30%。

美国计划于2022年发射“地球静止碳循环观测站(GeoCarb)”,拟在35000km左右的高空观察美洲地区植物以及二氧化碳、一氧化碳和甲烷等温室气体。欧洲空间局地球探测者8号(Earth Explorer-8)希望在2025年左右提供高精度高空间分辨率碳源汇数据,并在2030年之前完成二氧化碳排放观测业务系统。

我国已具备研制新一代碳卫星的基础和能力,应开展星-空-地一体化碳核查研究,发展主动、被动混合遥感碳核查体系,进行地形地物高度、叶绿素荧光和二氧化碳浓度综合观测,实现从局地到全球的多尺度、高精度碳源汇动态核查及年度核查报告发布,为应对我国在联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)和生物多样性与生态系统服务科学-政策政府间平台(IPBES)中面临的挑战提供科学支撑。

中国科学院院士

中华人民共和国科学技术部原部长

韩进华

2017年9月15日

# 前言

我国于2016年12月22日成功发射了碳卫星(TanSat)。为了支持我国碳卫星成功发射和高效利用,2012年6月21日,以“服务于碳交易的陆地生态系统遥感碳计量方法研究”为题,在广州广东省科学技术厅答辩竞争国家高技术研究发展计划(863计划)地球观测与导航技术领域前沿技术研究类项目。经近半年的专家论证,2013年2月17日,决定将“服务于碳交易的陆地生态系统遥感碳计量方法研究”题目改为“碳核查遥感技术体系研究”,并作为“基于碳卫星的遥感定量监测应用技术研究”项目的课题之一给予资助。

来自北京师范大学珠海分校、苏州一科城市投资发展有限公司、中国内蒙古森林工业集团有限责任公司、上海盛图遥感工程技术有限公司、江苏师范大学、中国矿业大学、南京大学、中国测绘科学研究院、北京林业大学和山东农业大学,以及中国科学院地理科学与资源研究所、清华大学和北京师范大学的科研骨干,组织形成了14个研究团队,分别执行以下专题任务:①珠海实验示范区地面数据观测;②基于多时相的典型示范区土地利用/覆盖及变化检测;③碳通量遥感机理模型;④典型区域陆地生态系统碳循环数值模拟;⑤HASM碳源汇模拟系统;⑥典型城市碳核查研究及应用示范;⑦典型城市碳核查监测点网络布控;⑧典型城市碳核查信息系统研究;⑨典型城市碳核查遥感方法研究;⑩典型城市碳核查标准规范研究;⑪典型森林生态系统区域碳核查研究及应用示范;⑫典型森林生态系统碳储量时空分析及遥感反演;⑬典型森林生态系统群落生物量模拟及碳储量估算;⑭典型森林生态系统碳观测及其标准规范。

2016年12月1日,课题完成了任务书规定的研究内容、达到了任务书要求的考核指标,通过了国家遥感中心组织的专家组验收。

在徐冠华院士及碳核查体系指导委员会和学术委员会的指导和帮助下,通过对“碳核查遥感技术体系研究”课题成果的提炼、修正和补充,编著形成了《碳核查体系导论》一书。

全书共分8章。第1章由岳天祥研究员撰写,主要概括总结了碳源汇星基、空基和地基观测的反演算法、空间插值和模拟分析的研究进展及其存在的主要理论问题。第2章主要由王鼎益研究员、张丽丽博士和刘冬冬博士撰写,内容包括二氧化碳浓度反演系统的基本思路、反演算法原理、软件系统构成和误差分析等。第3章由岳天祥研究员、赵明伟博士和张丽丽博士撰写,论述了高精度曲面建模

(HASM) 方法的基本原理及基于 HASM 的二氧化碳柱浓度空间插值过程, 包括二氧化碳柱浓度残缺曲面的空缺填补、二氧化碳柱浓度散点数据空间插值及 OCO-2、GOSAT 和 SCIMACHY 二氧化碳柱浓度插值结果的空间特征比较分析等。第 4 章由岳天祥研究员、赵明伟博士和王轶夫博士撰写, 主要论述了以卫星遥感数据为驱动场、以地面清查数据为优化控制条件的碳储量 HASM 数据融合方法, 以及以全球温室气体地面观测站数据为优化控制条件、以 GEOS-Chem 模型输出为驱动场的地表二氧化碳浓度 HASM 数据融合方法。第 5 章由陈报章研究员和张慧芳博士撰写, 论述了大气二氧化碳数据同化系统的构建、关键参数和误差分析方法以及碳同化系统的应用。第 6 章由岳天祥研究员和王轶夫博士撰写, 介绍了森林碳储量同化系统的构架、驱动模型与驱动数据、HASM 同化算法和精度验证等。第 7 章主要由岳天祥研究员、张丽丽博士和刘羽博士撰写, 主要介绍了中国碳卫星 (TanSat) 校飞实验载荷和地面同步观测以及地表二氧化碳浓度模拟分析和二氧化碳柱浓度反演与模拟分析过程。第 8 章由岳天祥研究员撰写, 分析了二氧化碳主动遥感相对于被动遥感的主要优势和研究进展、激光激发荧光技术和日光激发荧光技术的碳储量研究现状、地形地物高度主动遥感的核心研究内容等, 提出了星-空-地一体化的主动、被动混合遥感碳核查体系的概念框架。

在此, 向为完成本书给予过指导和帮助的老师 and 前辈们, 以及付出艰苦劳动和辛勤汗水的课题组人员表示真挚的谢意。

作 者

2017 年 6 月

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第 1 章 碳核查体系研究进展与问题 .....   | 1   |
| 1.1 引言 .....               | 1   |
| 1.2 二氧化碳浓度观测、反演与模拟分析 ..... | 2   |
| 1.3 碳储量研究 .....            | 10  |
| 1.4 模拟分析平台 .....           | 19  |
| 1.5 碳核查中存在的主要问题 .....      | 20  |
| 第 2 章 二氧化碳浓度反演系统 .....     | 23  |
| 2.1 引言 .....               | 23  |
| 2.2 基本思路 .....             | 24  |
| 2.3 算法原理 .....             | 27  |
| 2.4 处理软件系统描述 .....         | 47  |
| 2.5 误差分析 .....             | 51  |
| 2.6 小结 .....               | 62  |
| 第 3 章 二氧化碳柱浓度空间插值模型 .....  | 63  |
| 3.1 引言 .....               | 63  |
| 3.2 HASM 方法 .....          | 64  |
| 3.3 数据介绍 .....             | 67  |
| 3.4 二氧化碳柱浓度残缺曲面的空缺填补 ..... | 71  |
| 3.5 二氧化碳柱浓度散点数据空间插值 .....  | 80  |
| 3.6 二氧化碳柱浓度空间特征分析 .....    | 91  |
| 3.7 小结 .....               | 97  |
| 第 4 章 碳源汇数据融合 .....        | 98  |
| 4.1 引言 .....               | 98  |
| 4.2 森林碳储量数据融合 .....        | 98  |
| 4.3 二氧化碳浓度数据融合 .....       | 119 |
| 4.4 小结 .....               | 132 |
| 第 5 章 大气二氧化碳数据同化系统 .....   | 134 |
| 5.1 引言 .....               | 134 |
| 5.2 碳同化系统构建 .....          | 141 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 5.3 碳同化系统关键参数及误差分析 .....            | 145 |
| 5.4 碳同化系统的应用及分析 .....               | 149 |
| 第6章 森林碳储量数据同化模型 .....               | 175 |
| 6.1 引言 .....                        | 175 |
| 6.2 同化系统框架 .....                    | 175 |
| 6.3 陆面过程驱动模型与驱动数据 .....             | 176 |
| 6.4 观测数据与观测算子 .....                 | 183 |
| 6.5 同化算法 .....                      | 187 |
| 6.6 模型精度验证 .....                    | 189 |
| 6.7 结果分析 .....                      | 195 |
| 6.8 小结 .....                        | 206 |
| 第7章 中国碳卫星 (TanSat) 校飞实验 .....       | 208 |
| 7.1 引言 .....                        | 208 |
| 7.2 碳卫星校飞实验 .....                   | 208 |
| 7.3 地表 CO <sub>2</sub> 浓度分布模拟 ..... | 218 |
| 7.4 XCO <sub>2</sub> 反演与模拟 .....    | 223 |
| 7.5 小结 .....                        | 230 |
| 第8章 展望 .....                        | 231 |
| 8.1 引言 .....                        | 231 |
| 8.2 二氧化碳主动遥感 .....                  | 231 |
| 8.3 叶绿素荧光 .....                     | 234 |
| 8.4 地形地物高度主动遥感 .....                | 237 |
| 8.5 小结 .....                        | 245 |
| 参考文献 .....                          | 247 |

# 第1章 碳核查体系研究进展与问题

## 1.1 引言

碳源汇估算有很大的不确定性。例如,美国能源部和美国国家环境保护局(简称美国环保局;U. S. Environmental Protection Agency, EPA)对发电厂排放的估算相差16.9% (Ackerman and Sundquist, 2008),欧洲联盟(简称欧盟)四种调查方法的不确定性为7% (Ciais et al., 2010a),中国排放估算的不确定性在15%~20% (Gregg et al., 2008)。由于二氧化碳观测在全球尺度的时空局限性,未来气候变化预测有很大的不确定性 (Yoshida et al., 2011)。不考虑生态和社会等因素,仅联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)估计的二氧化碳浓度翻倍对全球气温影响的不确定性就至少为3℃ (IPCC, 2013)。

卫星遥感是监测全球二氧化碳时空变化的最有效手段之一。人们期望其观测结果可以减小碳源汇估算的不确定性。星基观测可通过对地球表层大部分地区二氧化碳源汇的高密度测量,弥补地面定点观测网的缺陷。另外,星基观测可提供技术标准一致的全球二氧化碳空间分布,包括很难到达地区的全覆盖数据。然而,大气二氧化碳浓度的星基观测估计仍面临一系列挑战,其首要问题是误差太大。例如,欧洲空间局(简称欧空局;European Space Agency, ESA)的大气制图扫描成像吸收光谱仪(the scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric cartography, SCIAMACHY)、日本的温室气体观测卫星(greenhouse gases observing satellite, GOSAT)和美国的轨道碳观测卫星(orbital carbon observatory, OCO)为人们提供了实现全球覆盖的现实机遇,但星基观测数据分散和潜在纰漏,使其很难达到碳源汇估计所需精度,还不足以提高人们对碳源汇的认识 (Breon and Ciais, 2010)。

地基碳源汇观测包括三种方法:①通过全球分布台站观测大气二氧化碳浓度;②运用涡度相关法从通量塔直接测量各种生态系统的碳源汇;③通过碳储量采样和调查,推断碳源汇变化。尽管地基碳源汇观测网在不断扩展和加密,然而,很显然永远不可能达到在微观尺度开展全球碳通量观测所需要的观测点密度,尤其在海洋和无法进入的大片森林地区。也就是说,虽然地基观测可用于计算全球大

气二氧化碳浓度增长率,可为空间梯度分析提供有用信息;但是,由于地面观测点太稀疏,很难准确推断区域尺度二氧化碳浓度的空间分布(O'Dell et al., 2012)。

为了满足碳源汇估计的精度需求,需要实现卫星观测、航空观测和地面实测的有效融合及其与大气传输模型的无缝耦合。也就是说,将地面实测和航空观测得到的细节信息融入碳卫星观测到的宏观信息,并与机理模型耦合有望大幅度提高碳源汇模拟精度。

## 1.2 二氧化碳浓度观测、反演与模拟分析

### 1.2.1 碳卫星

2009年1月,日本成功发射了温室气体观测卫星(GOSAT);美国在总结2009年2月发射轨道碳观测卫星1号(OCO-1)失败经验的基础上,于2014年7月成功发射轨道碳观测卫星2号(OCO-2),并于2014年8月开始接收数据。2016年12月,我国成功发射碳卫星(TanSat)。这三颗卫星专门用于监测二氧化碳柱浓度( $\text{XCO}_2$ )。大气制图扫描成像吸收光谱仪(SCIAMACHY)是欧空局于2002年3月成功发射的大型环境卫星(ENVISAT-1, ENVISAT 全称为 environmental satellite)上搭载的载荷之一,其使用期为2002年3月~2012年4月。虽然,SCIAMACHY不是专门用于二氧化碳观测,但它首次展示了二氧化碳柱浓度的全球分布。

除SCIAMACHY、GOSAT和OCO之外,还有许多在较低分辨率下监测全球二氧化碳浓度的其他卫星遥感观测仪器(Dennison et al., 2013),如大气红外探测器(the atmospheric infrared sounder, AIRS)、对流层发射光谱仪(tropospheric emission spectrometer, TES)和红外大气探测干涉仪(infrared atmospheric sounding interferometer, IASI)。AIRS搭载于2002年发射的地球观测系统(earth observing system, EOS) Aqua卫星(Aumann et al., 2003),用于研究对流层二氧化碳在全球的变异性(Jiang et al., 2010)。IASI搭载于2006年发射的欧洲MetOp平台,提供了无云条件下对流层上层的二氧化碳浓度全球分布图(Crevoisier et al., 2009)。

除SCIAMACHY、GOSAT、OCO-2和TanSat外,还有许多未来温室气体观测卫星发射计划,包括国际上的MicroCarb、Merlin、Sentinel-5p、Geocarb和ASCENDS等,以及我国的风云三号02批D星(FY-3D)等科学实验卫星。法国与英国合作将于2018年发射的MicroCarb,旨在研究大气二氧化碳通量,更好地认识碳收支。德国-法国甲烷遥感雷达卫星(Merlin)将于2019年发射。Sentinel-5P是一个已经

获批的全球环境与安全监测 (global monitoring for environment and security, GMES) 欧洲计划框架内的近地轨道预运行任务, 由欧空局 (ESA) 和荷兰空间办公室 (Netherlands Space Office, NSO) 合作完成, 其目的是填补欧空局 SCIAMACHY 与美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) Aura 任务臭氧监测仪 (OMI) 之间的缺口, 将于 2020 年发射。二氧化碳夜、昼、季排放主动传感 (ASCENDS) 将由美国国家航空航天局在 2023 ~ 2026 年发射, 其主要目的是认识二氧化碳在全球碳循环中的作用。

二氧化碳浓度模拟分析主要包括: 基于卫星光谱信息的二氧化碳浓度反演、空间插值、地面观测、星空地数据融合及数据同化。

### 1.2.2 二氧化碳浓度反演算法

目前, 全球范围广泛使用的反演算法包括修正的差分光学吸收光谱加权函数法 (weighting function modified differential optical absorption spectroscopy, WFM-DOAS)、差分光学吸收光谱不来梅最优估计法 (Bremen optimal estimation, DOAS, BESD)、日本国立环境研究所 (National Institute for Environment Studies, NIES) 算法、光子路径概率密度函数法 (photopath-length probability density function, PPDF)、大气二氧化碳空间观测法 (atmospheric CO<sub>2</sub> observations from space, ACOS)、莱斯特大学全物理算法 (the University of Leicester full physics, UoL-FP)、碳远程操作法 (remote sensing of greenhouse gases for carbon cycle modelling, RemoTeC)、二氧化碳简单经验模型 (SECM) 和集合中位数算法 (ensemble median algorithm, EMMA)。

WFM-DOAS 是一种基于缩放预选垂直廓线的无约束线性最小二乘法, 它是为搭载于欧空局环境卫星 ENVISAT-1 的制图扫描成像吸收光谱仪 (SCIAMACHY) 开发的, 以 SCIATRAN 矢量大气传输模式为基础的一种算法 (Buchwitz et al., 2000, 2006)。线性拟合的参照光谱包括示踪气体全柱加权函数、一个温度廓线移动加权函数和一个低阶多项式。线性化辐射传输模型与低阶多项式相加来拟合观测的归一化太阳辐射。基于 DOAS 的算法只考虑吸收, 但不考虑大气散射 (Buchwitz et al., 2000b)。通常情况下可得到足够准确的反演结果, 但当有光学薄云或气溶胶出现时, 忽略散射会导致大的无法接受的反演误差 (Houweling et al., 2005; Aben et al., 2007; Butz et al., 2009)。Schneising 等 (2008, 2011, 2012) 运用乘法于绝对辐射定标对 WFM-DOAS 进行了改进。在 WFM-DOAS 算法中, 对气溶胶情景和地表反照率进行了假定, 当实际的等效光学路径长度与假定的光学路径长度有差异时, 反演结果就会出现很大误差。Heymann 等 (2012) 为了进一步改进 WFM-DOAS 算法, 将恒定气溶胶垂直廓线运用于辐射传输模拟, 引进了云

探测算法。

Reuter 等 (2010) 在 WFM-DOAS 算法 (Buchwitz et al., 2000b) 和最优估计 (Rodgers, 2000) 的基础上, 开发了不来梅最优估计 DOAS 算法 (BESD/C)。BESD/C 算法类似于为 SCIAMACHY 研发的反演算法, 但并不完全一致, 如状态向量要素就有所不同 (Bovensmann et al., 2010)。BESD/C 基于最优估计, 并用先验信息约束反演过程。为了提高 BESD/C 二氧化碳柱浓度和甲烷柱浓度的随机误差和系统误差运算速度, Buchwitz 等 (2013) 研发了以气溶胶光学厚度、卷云光学厚度和卷云高度等为输入参数的误差参数化方法。BESD/C 算法在考虑不同太阳天顶角、气溶胶总量和卷云参数的基础上, 计算了各种情景的陆地植被叶绿素荧光, 以此改进二氧化碳柱浓度的反演精度。叶绿素荧光参数是一组用于描述植物光合作用机理和光合生理状况的变量或常数值, 反映了植物“内在性”的特点, 被视为是研究植物光合作用与环境关系的内在探针。

日本国立环境研究所 (NIES) 研发了通过碳观测热红外和近红外传感器 (thermal and near-infrared sensor for carbon observation, TANSO) -傅里叶变换分光仪 (Fourier transform spectrometer, FTS) (TANSO-FTS) 获取的短波红外光谱反演二氧化碳和甲烷柱浓度的 NIES 算法 (Yoshida et al., 2011)。GOSAT 的 NIES 算法基于最优估计法 (Rodgers, 2000), 它包括一个无偏云探测算法 (Ishida and Nakajima, 2009)。1.6 $\mu\text{m}$  光谱波段二氧化碳吸收带、1.67 $\mu\text{m}$  光谱波段甲烷吸收带和 0.76 $\mu\text{m}$  光谱区氧吸收带用于二氧化碳和甲烷柱浓度反演。Yoshida 等 (2013) 为了改进 NIES 反演算法, 替换了太阳辐照度数据库、精炼了气溶胶光学特性、改进了气溶胶垂直廓线处理、消除了地表气压偏差。

Oshchepkov 等 (2008) 为 GOSAT 研发了光子路径概率密度函数的参数化算法 (photon path-length probability density function, PPDF)。它运用近红外光谱区阳光反射来反演二氧化碳浓度, 并考虑薄云的影响。云影响的参数化基于蒙特卡洛法的光子轨迹统计分析 (Bril et al., 2007)。当 PPDF 算法忽略光路修正时, 可简化为 DOAS 算法 (Oshchepkov et al., 2012), 也就是说, DOAS 算法是 PPDF 算法的特例。

美国国家航空航天局的大气二氧化碳空间观测 (ACOS) 反演算法运用了最优估计法, 其正向模型参数在先验信息的约束条件下, 被优化为使正向模型模拟光谱与观测光谱达到最佳匹配的值 (Rodgers, 2000; Crisp et al., 2012)。莱斯特大学全物理算法 (UoL-FP) 包括一个正向模型 (forward model) 和一个反向模型 (inverse method) (Boesch et al., 2006)。正向模型由辐射传输模型、太阳光谱模型和仪器模型构成; 反向模型基于最优估计法 (Rodgers, 2000)。UoL-FP 反演算法通过正向模型模拟的近红外 0.76 $\mu\text{m}$  氧吸收带光谱波段、1.61 $\mu\text{m}$  和 2.06 $\mu\text{m}$  二氧

化碳吸收带光谱波段与 OCO-2 仪器观测光谱波段的最佳拟合来反演二氧化碳柱浓度。UoL-FP 反演算法与 ACOS 反演算法是为 OCO 碳卫星平行开发的两个算法, 它们的反演策略大致相似, 两个算法的不同之处是状态向量的定义、先验值和先验方差, 尤其是气溶胶和卷云的处理 (Cogan et al., 2012)。

碳远程操作法 (RemoTeC) 是一种通过参数化粒子数量、粒子分布高度和微物理特性来反演气溶胶参数和二氧化碳柱浓度的反演算法 (Butz et al., 2009)。气溶胶和卷云散射的光路改变已经被确认为通过太阳近红外散射测量反演二氧化碳柱浓度误差的主要来源。RemoTeC 算法的关键是它有能力运用有效的辐射传输模型, 同时反演二氧化碳浓度和大气的粒子散射特性 (Hasekamp and Butz, 2008)。粒子散射特性通过全柱粒子密度、体积分布参数和分布高度参数刻画的单一球形粒子模型来参数化 (Butz et al., 2011)。

二氧化碳简单经验模型 (SECM) 是以二氧化碳柱浓度和混合比廓线的形式, 模拟大气二氧化碳背景浓度的最小二乘回归模型。其方程基于 17 个经验参数, 以及纬度和日期。其经验参数通过最小二乘回归, 拟合美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 开发的碳追踪同化系统 (Carbon Tracker) 模拟结果来确定 (Reuter et al., 2012)。SECM 的自变量是日期和纬度, 根据目前的大气二氧化碳浓度知识, 其模拟结果可以达到 94% 的解释率。SECM 模拟结果可作为先验信息, 单独用于最优估计框架的大气二氧化碳浓度反演算法。

研究表明, 在适当条件下, 集合平均、加权平均或集合中位数平均优于每一个单独模型的模拟结果 (Kharin and Zwiers, 2002; Vautard et al., 2009)。基于这种思路, Reuter 等 (2013) 提出了集合中位数平均算法 (EMMA)。它综合了 WFM-DOAS、BESD、NIES、NIES-PPDF、ACOS、UoL-FP 和 RemoTeC 等算法的反演结果。这 7 种算法的基本原理相同, 可归纳为以下几点: ①用卫星仪器测量近红外氧气和二氧化碳吸收带的后向散射太阳辐射; ②运用正向模型模拟已知参数向量和未知状态向量的卫星测量结果; ③运用反向模型找出使模拟辐亮度与测量辐亮度最一致的状态向量; ④反演的状态向量即为最可能的大气状态。然而, 它们基于不同的反向模型、辐射传输的不同物理假设及不同的预处理和后处理过滤器。EMMA 是一个 L2 层二氧化碳柱浓度数据库 (Liu and Yang, 2016)。

我国许多单位已开展了相关研究。例如, 南京信息工程大学利用风云三号气象卫星红外分光计反演了大气二氧化碳浓度 (戴铁, 2008); 西安交通大学运用高光谱卫星遥感反演了二氧化碳浓度 (代海山, 2012); 华东师范大学对大气红外探测器参数进行了评价, 考察了中国对流层二氧化碳浓度时空分布特征 (束炯, 2013); 中国科学院遥感与数字地球研究所运用阻尼牛顿法对光子路径概率密度函

数法 (PPDF) 进行了修正, 提出了具有气溶胶散射效应估算校正的二氧化碳浓度反演算法 (邹铭敏, 2013; 陈良富等, 2015); 中国科学院大气物理研究所耦合正向模型、大气和地表参数, 以及先验信息和物理参数数据库, 建立了短波红外大气二氧化碳柱浓度反演算法 (刘毅等, 2011, 2013a; 杨东旭, 2013; 王飞, 2015; Liu et al., 2013, 2014; Cai et al., 2014) 并成功应用于 GOSAT 和 TanSat 观测数据的反演与模拟分析中 (Chen et al., 2017a, 2017b; Yang et al., 2013, 2014, 2015, 2017; 杨东旭等, 2016; 王婧等, 2014)。

### 1.2.3 二氧化碳浓度空间插值

二氧化碳的垂直柱浓度通常在仪器参照系中表达 (L2 产品)。为了得到二氧化碳浓度曲面, L2 产品必须以适合的方法投影到经纬度网格上, 形成 L3 产品 (Kuhlmann et al., 2014)。通过曲线拟合或统计回归描述大气二氧化碳浓度空间分布, 在地面实测领域已有悠久历史 (Reuter et al., 2012)。例如, 为了分析二氧化碳浓度的纬向分布和时间演化, Komhyr 等 (1985) 将样条函数法用于拟合美国国家航空航天局的二氧化碳采样网。Lancaster 和 Salkauskas (1986) 将多项式样条用于二氧化碳曲面拟合。Kobza 和 Mlcak (1994) 运用一个矩形点阵上的已知平均值构建了一个样条曲面。Masarie 和 Tans (1995) 为美国国家航空航天局二氧化碳瓶采样网开发了一个时空内插和外差方案。Kuhlmann 等 (2014) 发展了一种抛物型样条函数法, 用于生成卫星观测区域示踪气体地图, 样条函数系数由一维样条函数计算获得, 适用于大数据处理。

有几种方法已运用于二氧化碳柱浓度 ( $\text{XCO}_2$ ) 空间分布制图, 也就是将遥感反演算法形成的 L2 数据插值为二氧化碳柱浓度 ( $\text{XCO}_2$ ) 全覆盖图 (即 L3 数据)。例如, Crevoisier 等 (2009) 运用移动平均法将红外大气探测干涉仪 (IASI) 观测的反演数据插值为空间分辨率为  $5^\circ \times 5^\circ$  的对流层上层二氧化碳浓度全球地理分布图。Kulawik 等 (2010) 运用简单平均法将对流层发射光谱仪 (TES) 观测的反演数据插值为  $10^\circ \times 10^\circ$  空间分辨率的二氧化碳浓度曲面。Hammerling 等 (2012a; 2012b) 运用克里格法将 GOSAT 观测的 L2 反演数据, 插值为  $1^\circ \times 1.25^\circ$  空间分辨率的全球 L3 二氧化碳柱浓度分布图。Yue 等 (2015) 将高精度曲面建模 (high accuracy surface modeling, HASM) 方法运用于 GOSAT 和 SCIAMACHY 二氧化碳柱浓度曲面的空缺插补。

### 1.2.4 碳源汇地面与航空观测

可全球共享数据的地面与航空观测网主要包括总碳柱观测网 (total carbon

column observing network, TCCON)、全球温室气体参照网 (global greenhouse gas reference network, GGGRN)、民航示踪气体综合观测网 (CONTRAIL) 和涡度相关通量塔全球网 (FLUXNET)。

为了精准和精确地测量二氧化碳柱浓度, 美国轨道碳观测卫星 (OCO) 组提议, 并于 2004 年建立了总碳柱观测网, 实现了与世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 标准的一致性校准, 该网络已成为碳卫星在轨数据验证的重要依据。目前, 总碳柱观测网为欧空局 SCIAMACHY、日本 GOSAT 和美国 OCO-2 提供了二氧化碳浓度反演的最为重要验证数据。总碳柱观测网是一个傅里叶变换光谱仪地基网, 目前全球有 27 个站, 主要设计目的是通过近红外吸收光谱反演二氧化碳、甲烷、二氧化氮和一氧化碳的柱浓度。其科学目标是提高人们对碳循环的认识、为星基观测的二氧化碳柱浓度和甲烷柱浓度反演提供验证数据集、为卫星测量和地基网实测提供转换标准 (Wunch et al., 2011)。由于二氧化碳柱浓度对地表气压和大气中水蒸气的变化不敏感, 因此与地面测量相比, 很少受垂直传输影响; 与星基传感器观测相比, 很少受气溶胶、气团不确定性或陆面属性变化的影响。

在 20 世纪 90 年代初, 美国国家海洋和大气管理局建立了全球温室气体参照网, 其地球系统研究实验室 (Earth System Research Laboratory, ESRL) 据此研发了二氧化碳和一氧化碳分析系统。全球温室气体参照网使用了分布在全美国高于 300m 的电视广播发射塔, 为美国国家海洋和大气管理局的二氧化碳数据同化系统 (Carbon Tracker) 原型提供了验证数据。从高塔不同高度的观测, 表达了二氧化碳浓度垂直梯度, 反映了当地和远处碳源的相对影响 (Bakwin et al., 1998)。Andrews 等 (2014) 发现, 100m 高度以上高塔的测量结果, 基本不受附近植被和局地排放的影响。

民航示踪气体综合观测网 (CONTRAIL) 正在全球范围的 43 个机场观测二氧化碳垂直廓线 (Basu et al., 2014)。在参与民航示踪气体综合观测网项目的飞机前货舱支架上, 安装一个自动空气采样设备 (automatic air sampling equipment, ASE) 和一个连续二氧化碳测量设备 (continuous CO<sub>2</sub> measuring equipment, CME)。连续二氧化碳测量设备主要由一个无色散红外分析仪、一个数据记录仪和两个二氧化碳现场测定校准气缸组成; 自动空气采样设备主要为瓶采样设计, 包括一个可容纳 12 个长颈瓶的控制板, 并与金属隔膜泵连接。连续二氧化碳测量设备平台主要用于进行高频二氧化碳测量, 获取详细的大范围空间观测数据; 而自动空气采样设备不仅提供有用的二氧化碳空间分布数据, 还提供其他各种示踪气体数据, 以及它们的同位素比。自动空气采样设备和连续二氧化碳测量设备都通过飞机数据系统相关飞行参数输入来自动控制 (Machida et al., 2008)。