

农业源温室气体 监测技术规程与 控制技术研究

Agricultural Sources of Greenhouse Gas
Monitoring Technology Research Procedures and Control Technology

王立刚 邱建军 等 著



科学出版社

农业源温室气体监测技术 规程与控制技术研究

王立刚 邱建军 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统总结了农业源温室气体监测与控制技术研究的成果。主要包括规范了农业源（旱地、水稻田、放牧草地和畜禽养殖）温室气体监测方法与技术规程；在多年系统监测的基础上，在国内首次针对农业源温室气体减排问题，从技术的角度，总结提升了涵盖旱地、水稻田、放牧草地和畜禽养殖的 30 余项温室气体控制技术，每一项技术都针对目前农业生产的实际问题，对已突破的技术环节和效益进行了系统概述；创建了农田生态系统管理技术温室气体效应评价方法体系，并以华北平原（冬小麦-夏玉米种植模式）和东北平原（春玉米种植模式）为例开展了技术效应的评价研究，为国家“节能减排”的实现和在保障产量（生物量）基础上的温室气体减排技术方案提供科学依据与支撑。

本书可供农学、生态学、土壤与肥料学、环境科学等相关领域的研究人员使用，也可供农业技术推广人员、农业及环境管理决策部门人员阅读与参考。

图书在版编目（CIP）数据

农业源温室气体监测技术规程与控制技术研究/王立刚等著. —北京：科学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-03-046680-8

I. ①农… II. ①王… III. ①农业区-有害气体-环境监测-技术操作规程-研究 ②农业区-有害气体-环境监测-控制-研究 IV. ①X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 306531 号

责任编辑：李秀伟 / 责任校对：郑金红

责任印制：肖 兴 / 封面设计：北京图阅盛世文化有限公司

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

*

2016 年 3 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张：14 3/4

字数：340 000

定价：148.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

本书得到公益性行业（农业）科研专项项目“农业源温室气体监测与控制技术研究”（201103039）与中国农业科学院创新工程联合资助。

项目主持人：邱建军 王立刚

主持单位：中国农业科学院农业资源与农业区划研究所

参加研究单位及人员

中国农业科学院农业资源与农业区划研究所：李 虎 王迎春 李建政

张 婧 翟 振 王艳丽 孙 媛 高懋芳 王虹扬 黄诚诚 江雨倩

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所（畜禽养殖）：

董红敏 朱志平 陈永杏

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所（双季稻）：

李玉娥 秦晓波 万运帆

中国科学院大气物理研究所：郑循华 刘春岩

中国农业大学：巨晓棠 孟凡乔 陈海青 潘志华 苏 芳 李雪倩 高 兵

高 超 刘 燕 朱高荻 刘洪星 郭婧宇 赵自超 谭月臣 徐 聪

王立为 高 琳 石岳峰 石 璟 赵自超 谭月臣 韩 笑 张 洁

中国科学院南京土壤研究所：颜晓元 徐 华 马 静 于海洋 张广斌

中国科学院沈阳应用生态研究所：徐 慧 董 丹 杨伟超 孔 双 郭彦玲

夏宗伟 王振宇 白 雪 马学军 寇涌革 李玉婷

山东省农业科学院农业资源与环境研究所：江丽华 徐 钰 谭德水 王 梅

郑福丽 魏建林 李国生

辽宁省农业科学院环境资源与农村能源研究所：

刘慧颖 董 环 张 鑫 韩瑛祚 华利民

西北农林科技大学：郭胜利 姜继韶 吴得峰 王志齐 李如剑 高鹏程

同延安 张 海 王少杰 胡 腾 方 明 何帅兵

安徽农业大学：马友华 杨书运 严 平

华中农业大学：鲁剑巍 任 涛

甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所：吕晓东 马忠明

四川省农业科学院土壤肥料研究所：吕世华

内蒙古大学：梅宝玲

河南农业大学：高腾云 廉红霞 傅 彤 李改英 孙 宇

本书编委会名单

主 编：王立刚 邱建军

副主编：董红敏 郑循华 巨晓棠 颜晓元 徐 慧
江丽华 李玉娥 朱志平 李 虎 王迎春

编 者（按姓氏汉语拼音排序）：

陈永杏	董 丹	董仁杰	高 琳	高懋芳
高鹏程	高腾云	郭胜利	韩瑛祚	胡 腾
姜继韶	李建政	刘春岩	刘慧颖	鲁剑巍
吕世华	吕晓东	马 静	孟凡乔	潘志华
秦晓波	任 涛	石 璟	孙 媛	谭月臣
万运帆	王立为	王艳丽	魏建林	吴得峰
徐 聪	徐 华	徐 钰	杨书运	杨伟超
殷寒旭	张 婧	张 鑫	张广斌	赵自超

序

20 世纪以来，全球气候正经历着以变暖为主要特征的显著变化。从 1992 年的《联合国气候变化框架公约》和 1997 年的《京都议定书》，到 2009 年的《哥本哈根协议》和 2015 年的《巴黎协定》，全球气候变化及其影响日益成为世界关注的热点，被公认为关乎人类社会未来生存与发展的巨大挑战。

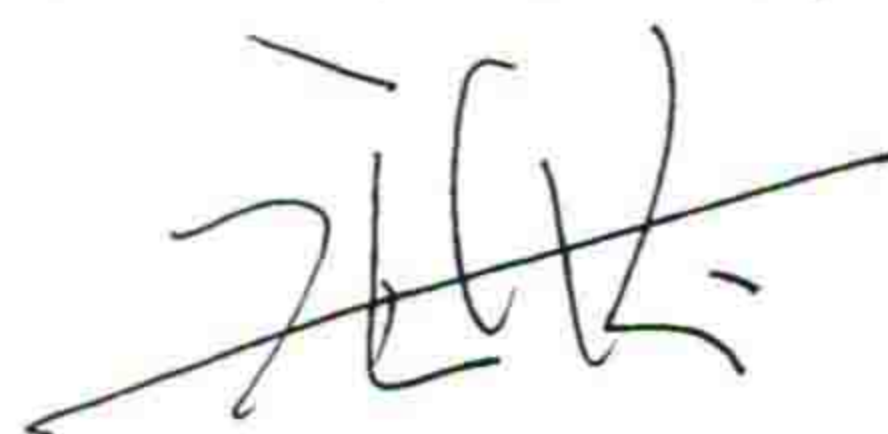
对于气候变化，联合国在 2013~2014 年发布了第五次《气候变化科学评估报告》，对全球变暖受到人类活动影响的可能性由上次报告的“非常高”（概率在 90%以上）调整至“极高”（概率在 95%以上）。人类今日所作的决定和选择，都会影响气候变化的走向。如果情况持续恶化，于 21 世纪末，地球气温将攀升至两百万年来的高位。当今，国际社会正在为应对气候变化的挑战而采取积极的行动。气候变化对我国的影响同样是机遇和挑战并存，最大限度地扩大气候变化的有利影响，规避不利影响，是我国应对气候变化面临的艰巨任务。中国作为负责任的发展中大国，于 2015 年 6 月，如期正式向联合国提交了“国家自主决定贡献”：二氧化碳排放 2030 年左右达到峰值并争取尽早达到峰值、单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65%，非化石能源占一次能源消费比重达到 20%左右，森林蓄积量比 2005 年增加 45 亿立方米左右。同时，还将应对气候变化的行动列入“十三五”发展规划中。中国向世界的承诺和实施的减缓、适应气候变化的政策与行动，都彰显了我国作为全球第二大经济体应该肩负的责任，让世界听到了中国声音、看到了中国方案。

农业是受气候变化影响最直接、最显著的产业，中国是一个人口众多的农业大国，畜禽饲养、水稻种植和农田施肥量在全球占有很大比例，同时，农业源温室气体减排潜力巨大，并且与农业生态系统生产力及生态环境息息相关，成为目前全球变化与陆地生态系统研究的焦点问题，被认为是最近 20~30 年减缓大气二氧化碳浓度升高的关键。以中国农业科学院农业资源与农业区划研究所英年早逝的邱建军研究员带领下的“碳氮循环”创新团队一直从事农业生态系统碳氮气体排放过程与减排机理、技术方面的研究工作，牵头组织了全国相关的优势科研单位，承担了公益性行业（农业）科研专项“农业源温室气体监测与控制技术研究”，经过 5 年的研究，积累了大量的野外实测数据、模型模拟结果，取得了一系列的创新性研究成果。规范了农业源（旱地、水稻田、放牧草地和畜禽养殖）温室气体监测方法与技术规程；在多年系统监测的基础上，在国内首次针对农业源温室气体减排问题，从技术的角度，总结提升了涵盖旱地、水稻田、放牧草地和畜禽养殖的 30 余项温室气体控制技术，为农业节能减排提供了科学依据与技术支持。

由王立刚、邱建军等著作的《农业源温室气体监测技术规程与控制技术研究》一书

既是对项目研究成果的总结，也可作为国内今后相关研究工作的参考。该书的出版将会促进农业生态系统碳、氮循环与温室气体排放相关研究的开展，是贯彻国家“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的农业行动计划。

中国工程院院士，中国农业科学院副院长



2016年1月30日

前 言

全球气候变化已成为不争的事实，人类活动向大气中排放过量的二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）和氧化亚氮（N₂O）等温室气体是导致气候变化的重要原因之一，解决气候变化问题的根本措施就是减少人为温室气体排放或增加对大气中温室气体（主要是 CO₂）的吸收。政府间气候变化专门委员会（IPCC）第 4 次评估报告表明，农业是温室气体的主要排放源之一，控制农业温室气体排放对减缓和适应全球气候变化具有重要作用，尤其是在未找到控制工业 CO₂ 排放替代技术前的最近 20~30 年，农业减排成为减缓大气 CO₂ 浓度升高的关键。目前，国际上对农业温室气体排放及其控制技术的研究方兴未艾。众多的国家政府机构、科研部门与社会团体均在关注全球变化的适应性研究与温室气体排放的系统监测及其控制技术。以全球变化研究为核心的四大姊妹计划——国际地圈生物圈计划（IGBP）、全球环境变化的人文因素计划（IHDP）、世界气候研究计划（WCRP）及生物多样性计划（DIVERSITAS）都将温室气体监测及其减排技术作为主要的研究内容。同时，对流层和平流层痕量温室气体的观测已经被列入全球陆地观测系统（GTOS）、全球通量观测网（FLUXNET）的框架中。中国是一个人口众多的农业大国，农田施肥量和水稻种植面积均为全球第一。中国农业生产活动基数大、增长快，如果没有相应的控制措施，农业源温室气体排放量也会相应地迅速增大。中国政府高度重视气候变化，在 2009 年哥本哈根气候大会上的减排承诺表明了我国的决心，但同时也面临巨大的减排压力。因此，迫切需要采取行动积极应对气候变化，农业源温室气体减排责无旁贷。

针对我国农业源温室气体系统监测与减排的科技需求，2011 年国家启动了实施了公益性行业（农业）科研专项项目“农业源温室气体监测与控制技术研究”（201103039）。本项目组织国内相关优势科研单位和技术力量进行协作攻关，实施建立起覆盖主要类型农业生态区的农业源（畜禽养殖、放牧草地、旱地、水稻田）温室气体（CO₂、N₂O、CH₄）监测网络，具备长期监测能力；明确主要农业源温室气体监测方法体系与技术规程；摸清典型农业源温室气体排放现状，探明排放规律；提出适合各个农业生态类型区的农业源温室气体控制技术与措施，为国家节能减排和参与相关国际履约谈判提供基础支撑。

本书是“农业源温室气体监测与控制技术研究”项目的成果集成。项目研究由中国农业科学院农业资源与农业区划研究所主持，中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所、中国科学院大气物理研究所、中国农业大学、中国科学院南京土壤研究所、中国科学院沈阳应用生态研究所、山东省农业科学院农业资源与环境研究所、辽宁省农业科学院环境资源与农村能源研究所、安徽农业大学、内蒙古大学、河南农业大学、四川省农业科学院土壤肥料研究所、西北农林科技大学、甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所、华中农业大学等多家单位共同承担了项目研究，共有近百名专家、技术人员投入到研究工作中，开展了协同攻关。通过近 5 年的共同研究，该项目的主要研究进展与标志性成果体现在以下 5 个方面：一是建立了我国农业源温室气体监测与控制技术研究网络，在我国典

型农业生态类型区建立了不同农业源的温室气体监测点 22 个（旱地 11 个、水稻田 5 个、放牧草地 3 个、畜禽养殖 3 个）；二是制订完成了不同农业源温室气体排放的监测方法和技术规程，填补了我国在农业源温室气体监测方法与技术规程上的空白；三是进行了系统的野外观测，探知了不同农业源温室气体排放规律和关键影响因素；四是针对不同生态类型区典型种植养殖模式进行了温室气体控制技术的筛选和研发，明确了控制技术筛选的策略和技术路线；五是完成了农业源温室气体监测数据库系统的研制与开发。

本书以农业源温室气体监测技术与方法为基础，重点是在系统监测的基础上，探讨保持农业生产力（种植业、畜牧业和放牧草地）、保持农业生态系统土壤长期肥力、提高肥料利用率，同时减少温室气体排放的多目标综合控制技术，并以农田生态系统为例，对综合控制技术的温室气体减排效果进行分析。全书共分为 13 章。在项目组全体成员协同攻关的基础上，各章统稿的具体分工如下：

第一章	邱建军	王立刚	李 虎	李建政								
第二章	王立刚	邱建军	郑循华	董红敏	巨晓棠	江丽华	徐 慧					
	颜晓元	李玉娥										
第三章	王立刚	郑循华	徐 慧	江丽华	李 虎							
第四章	颜晓元	李玉娥										
第五章	董红敏	朱志平										
第六章	郑循华	刘春岩										
第七章	王立刚	李 虎	徐 慧	江丽华	巨晓棠	王迎春	张 婧	王艳丽				
第八章	颜晓元	李玉娥	王立刚									
第九章	郑循华	刘春岩										
第十章	董红敏	朱志平	董仁杰	高腾云								
第十一章	李建政	王迎春	王立刚									
第十二章	王迎春	王立刚										
第十三章	李建政	王迎春	王立刚									

全书由王立刚、李虎、王迎春统稿，并最终定稿。

在这里特别需要铭记与感谢本项目原先的首席专家邱建军研究员，他是整个项目的指引者与领导者，从本项目最初的设计、具体实施、成果总结都倾尽大量的心血与精力，但在本项目即将结束的时候，他却因病医治无效与世长辞！他的离去对本项目是个莫大的损失，项目组全体成员万分悲痛。本书既是项目组集体智慧的结晶，也是告慰邱建军研究员的表达方式，谨以此书献给尊敬的邱建军研究员，以表达项目组全体成员对他的深切怀念！

由于农业源温室气体研究内容的复杂性与不确定性，再加上本书的主要内容是在项目成果的基础上提炼而成，因此在内容的系统性、完整性和代表性等方面不可能十分完善，我们在此抛砖引玉，真诚地希望广大学者、专家与同仁能在此领域进行更多的交流与合作，同时对本书的缺点与不足提出宝贵的意见。

著 者
2015 年 8 月于北京

目 录

序
前言

第一篇 绪 论

第 1 章 研究背景与研究内容	3
1.1 研究背景与意义	3
1.2 国内外研究进展	4
1.3 研究目标与主要研究内容	7
参考文献	9
第 2 章 研究区域与研究方法	13
2.1 技术路线	13
2.2 旱地农田监测点试验设计	15
2.3 水稻田监测点试验设计	24
2.4 放牧草地监测点试验设计	29
2.5 畜禽养殖监测点试验设计	32

第二篇 农业源温室气体监测方法与技术规程

第 3 章 旱作农田 N_2O 排放监测方法与技术规程	41
3.1 范围	41
3.2 规范性引用文件	41
3.3 术语和定义	41
3.4 监测前的准备工作	41
3.5 N_2O 排放通量监测气体取样要求	44
3.6 数据处理与分析要求	45
3.7 监测过程相关数据质量保证措施	47
第 4 章 水稻田 CH_4 和 N_2O 排放监测方法与技术规范	49
4.1 范围	49
4.2 规范性引用文件	49
4.3 术语和定义	49
4.4 温室气体排放的监测	50

4.5 样品的管理 53

4.6 样品的储存 53

4.7 样品的分析 54

第 5 章 畜禽养殖温室气体监测方法与技术规程 57

5.1 反刍动物甲烷排放量的测定——六氟化硫（SF₆）示踪法技术规程 57

5.2 动物粪便管理过程中温室气体排放监测技术规程 61

第 6 章 放牧草地 CH₄ 和 N₂O 排放通量监测方法与技术规程 65

第三篇 农业源温室气体控制技术

第 7 章 旱地农田温室气体控制技术 75

7.1 旱地春玉米种植模式 75

7.2 冬小麦-夏玉米轮作模式 88

7.3 设施蔬菜（含露地蔬菜）种植模式 101

7.4 北方马铃薯种植模式 111

参考文献 117

第 8 章 水稻田温室气体控制技术 122

8.1 单季稻种植模式 122

8.2 双季稻种植模式 134

参考文献 141

第 9 章 放牧草地温室气体控制技术 144

9.1 半干旱农牧交错区苜麦田-冬牧-夏牧-禁牧优化组合技术 144

9.2 半干旱农牧交错区农耕退化土地的人工草地修复技术 147

9.3 高寒草甸适当放牧与生态系统功能恢复技术 152

参考文献 156

第 10 章 畜禽养殖与废弃物处理温室气体控制技术 158

10.1 奶牛 TMR 添加营养舔砖饲喂技术 158

10.2 肉牛日粮中粗饲料配比优化饲喂技术 160

10.3 肉牛饲料中添加米曲霉饲喂技术 162

10.4 规模化猪场污水贮存蛭石覆盖减排技术 166

参考文献 168

第四篇 农田温室气体控制技术评价

第 11 章 农田温室气体控制技术评价方法的确定 173

11.1 评价指标的确定 173

11.2 评价方法的确定 179

11.3 农田投入温室气体排放因子的确定	183
参考文献	187
第 12 章 华北平原冬小麦-夏玉米轮作温室气体控制技术评价	194
12.1 试验和调研区域概况	194
12.2 APSIM 模型的校正和验证	198
12.3 模拟情景的设置与分析	203
参考文献	208
第 13 章 东北地区春玉米温室气体控制技术评价	210
13.1 数据的获取	210
13.2 APSIM 模型的初始化和验证	212
13.3 不同管理措施温室气体减排评价	215
参考文献	219

第一篇

绪 论

第 1 章 研究背景与研究内容

全球气候变化已经成为不争的事实，人类活动向大气中排放过量的二氧化碳（ CO_2 ）、甲烷（ CH_4 ）和氧化亚氮（ N_2O ）等温室气体是导致气候变化的重要原因之一，解决气候变化问题的根本措施就是要减少人为温室气体排放或增加对大气中温室气体的吸收。目前，发展低碳经济已经成为世界各国的共识，很多国家尤其是发达国家把低碳经济作为培育新的国家竞争优势的制高点，竞相发展低碳技术与低碳产业。低碳农业作为低碳经济的重要组成部分，而减少农业源温室气体排放则是发展低碳农业的重要支撑点（王青等，2012）。农业源温室气体排放主要包括农田土壤 CO_2 排放、反刍动物 CH_4 排放、水稻种植过程中的 CH_4 排放、施肥造成的农田土壤 N_2O 排放、动物废弃物管理过程中的 CH_4 和 N_2O 排放以及放牧草地的 N_2O 排放等。农业源温室气体排放总量虽然只占农业生态系统碳氮循环总量的极小份额，但是其与农业生态系统生产力及生态环境息息相关，成为目前全球变化与陆地生态系统研究的焦点问题（Liu and Greaver, 2009; Piao et al., 2009）。本研究针对我国农业源温室气体监测技术不规范、缺乏温室气体减排技术、减排效果不明确的问题，组织全国相关优势科研力量，围绕主要农业源开展温室气体监测和控制技术攻关研究，为国家节能减排目标的实现和农业可持续发展提供科学依据，为农业温室气体减排提供技术储备与支撑。

1.1 研究背景与意义

1. 农业是重要的温室气体排放源，控制农业源温室气体排放是减缓全球气候变化的现实需要

2007 年政府间气候变化专门委员会（IPCC）第 4 次评估报告表明，农业是温室气体的主要排放源，据估计，全球范围内农业排放 CH_4 占由人类活动造成的 CH_4 排放总量的 50%、 N_2O 占 60%，如果不实施额外的农业政策，预计到 2030 年农业源 CH_4 和 N_2O 排放量将会比 2005 年分别增加 60% 和 35%~60%。联合国粮食及农业组织（FAO）在 2006 年年末的报告《牲畜的巨大阴影：环境问题与选择》中估计每年有 75.16 亿 t 二氧化碳当量的温室气体是由牛、羊、骆驼、马、猪和家禽排放的，占全球总排放的 18%。控制农业源温室气体排放对减缓和适应全球气候变化具有重要作用，尤其是在未找到控制工业 CO_2 排放替代技术前的最近 20~30 年，农业减排成为减缓大气 CO_2 浓度升高的关键。

2. 中国是一个农业大国，有效控制农业源温室气体排放是国家应对气候变化、履行国际义务的重要举措

中国是一个人口众多的农业大国，畜禽饲养、水稻种植和农田施肥量在全球占有很大比例。进入 2000 年以来，中国年氮肥用量达到 2000 万 t（折纯）以上，消费总量为

世界第一，约占全球总量的 30%。根据《中国气候变化初始国家信息通报》，1994 年中国农业活动产生的 CH_4 和 N_2O 分别占全国 CH_4 和 N_2O 总排放量的 50.15% 和 92.47%，农业源温室气体占全国排放总量的 17%。据估算，2005 年反刍动物和动物粪便 CH_4 排放量为 1414 万 t，动物粪便 N_2O 排放量为 19.4 万 t，水稻田 CH_4 排放 589 万 t，农田排放 N_2O 为 78 万 t。中国农业生产活动基数大、增长快，如果没有相应的控制措施，农业源温室气体排放量也会相应地迅速增大。中国政府高度重视气候变化，在 2009 年哥本哈根大会上的减排承诺表明了我国的决心，但同时面临巨大的减排压力。因此，必须采取行动积极应对气候变化，农业源温室气体减排责无旁贷。

3. 农业源温室气体减排潜力巨大，当务之急应开展系统监测和强化综合控制技术的研究集成

我国农业农村现代化程度较低，农业源温室气体减排也存在巨大潜力。在生产减排方面，全国农田氮肥当季利用率仅有 30% 左右，如果氮肥利用率提高 1 个百分点，全国就可减少氮肥生产的 250 万 t 标准煤的能源消耗。在增加碳汇方面，我国草地和农田面积大，全国耕地平均有机碳含量低于世界平均的 30% 以上，低于欧洲 50% 以上，农业土壤具有巨大的固碳减排潜力。有关专家研究表明，通过改善反刍动物营养可降低单头肉牛甲烷排放 15%~30%；推广水稻田间歇灌溉可减少单位面积水稻田 CH_4 排放 30%；推行缓释肥料、长效肥料可减少农田 N_2O 排放 50%~70%。只要技术合理，农业源温室气体减排潜力巨大。而近 10 年来，我国政府的支持农村新能源开发利用、农业节能增效方面开展了卓有成效的工作，但缺乏从农业源温室气体监测和控制排放的角度进行全局性、系统性部署，没有建立起对农业源温室气体的系统监测网络，仅有的工作大多为科学家凭兴趣开展的零星监测。因此，迫切需要组织对我国农业源温室气体部署系统的监测，并开展控制技术研究，这对我国农业实现节能减排、为国际履约提供科学依据和技术支撑具有战略意义。

本研究利用农业源温室气体观测研究方面已有的工作基础，组织全国的优势力量，通过建立系统的农业源温室气体监测网络，获取统一、标准的农业源温室气体排放基础数据，进而科学评估农业温室气体减排潜力，并对综合控制技术进行研究、集成与示范，全面提升对农业源温室气体的监测能力和研究能力，这是当前形势的迫切需要。

1.2 国内外研究进展

1. 国际上相关工作进展

国际上非常重视全球气候变化的适应研究与温室气体排放的系统监测。从 1988 年成立政府间气候变化专门委员会 (IPCC)，1992 年 166 个国家和地区制定《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 以来，各个国家或地区相继开展相应的研究计划和工作。以全球变化研究为核心的四大姊妹计划——国际地圈生物圈计划 (IGBP)、全球环境变化的人文因素计划 (IHDP)、世界气候研究计划 (WCRP) 以及生物多样性计划 (DIVERSITAS) 都将温室气体监测及其减排技术作为主要的研究内容。同时，对流层和平流层痕量温室气体的观测已经被列入全球陆地观测系统 (GTOS)、全球通量观测网 (FLUXNET) 的框