

稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放

Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-based Ecosystems



蔡祖聪

徐 华 著

马 静

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

中国科学技术大学
校友文库

稻田生态系统
 CH_4 和 N_2O 排放

Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-based Ecosystems

蔡祖聪

徐 华 著

马 静

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

水稻是世界上最重要的粮食作物之一。由于水稻在特定的生长阶段需要淹水,水稻生产也成为大气温室气体 CH_4 的重要来源之一,同时此过程还排放另一种重要的大气温室气体—— N_2O 。本书结合国内外最新研究进展,总结了中国科学院南京土壤研究所过去 16 年对稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放的研究成果。全书共分 8 章,分别介绍了全球变化的最新研究进展,稻田土壤中 CH_4 和 N_2O 产生、转化和传输的基本过程,稻田 CH_4 和 N_2O 排放的研究方法,稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响因素,水稻生长过程中 CH_4 和 N_2O 排放基本过程的变化规律,排放量的时间和空间变化规律,宏观尺度的排放量估算以及减排措施。

本书可供从事陆地生态系统碳、氮循环与温室气体排放研究的科技工作者、该领域研究生、涉及全球变化的政府相关部门的决策者等参考。本书有助于关注温室气体排放与全球变化问题的读者了解水稻生产与全球变化的关系。

图书在版编目(CIP)数据

稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放 / 蔡祖聪,徐华,马静著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2009.2

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书:中国科学技术大学校友文库)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02259-3

I. 稻… II. ①蔡…②徐…③马… III. ①稻田—生态系统—甲烷—释放
②稻田—生态系统—氧化二氮—释放 IV. S511.06 S161.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 011256 号

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026

网址: <http://press.ustc.edu.cn>

印刷 合肥晓星印刷有限责任公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 710 mm×1000 mm 1/16

印张 24.5

字数 439 千

版次 2009 年 2 月第 1 版

印次 2009 年 2 月第 1 次印刷

印数 1—2000 册

定价 68.00 元

编 委 会

顾 问 吴文俊 王志珍 谷超豪 朱清时

主 编 侯建国

编 委 (按姓氏笔画为序)

王 水	史济怀	叶向东	伍小平
刘 兢	刘有成	何多慧	吴 奇
张家铝	张裕恒	李曙光	杜善义
杨培东	辛厚文	陈 颢	陈 霖
陈初升	陈国良	周又元	林 间
范维澄	侯建国	俞书勤	俞昌旋
姚 新	施蕴渝	胡友秋	骆利群
徐克尊	徐冠水	徐善驾	翁征宇
郭光灿	钱逸泰	龚 昇	龚惠兴
童秉纲	舒其望	韩肇元	窦贤康

总 序

侯建国

(中国科学技术大学校长、中国科学院院士、第三世界科学院院士)

大学最重要的功能是向社会输送人才。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度,很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的五十年,之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学之一,主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强,在国内外科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献,为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008年9月,胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信,信中称赞说:半个世纪以来,中国科学技术大学依托中国科学院,按照全院办校、所系结合的方针,弘扬红专并进、理实交融的校风,努力推进教学和科研工作的改革创新,为党和国家培养了一大批科技人才,取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果,为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

据统计,中国科大迄今已毕业的5万人中,已有42人当选中国科学院和中国工程院院士,是同期(自1963年以来)毕业生中当选院士数最多的高校之一。其中,本科毕业生中平均每1000人就产生1名院士和七百多名硕士、博士,比例位居全国高校之首。还有众多的中青年才俊成为我国科技、企业、教育等领域的领军人物和骨干。在历年评选的“中国青年五四奖章”获得者中,作为科技界、科技创新型企业界青年才俊代表,科大毕业生已连续多年榜上有名,获奖总人数位居全国高校前列。

鲜为人知的是,有数千名优秀毕业生踏上国防战线,为科技强军做出了重要贡献,涌现出二十多名科技将军和一大批国防科技中坚。

为反映中国科大五十年来人才培养成果,展示毕业生在科学研究中的最新进展,学校决定在建校五十周年之际,编辑出版《中国科学技术大学校友文库》,于2008年9月起陆续出书,校庆年内集中出版50种。该《文库》选题经过多轮严格的评审和论证,入选书稿学术水平高,已列为“十一五”国家重点图书出版规划。

入选作者中,有北京初创时期的毕业生,也有意气风发的少年班毕业生;有“两院”院士,也有IEEE Fellow;有海内外科研院所、大专院校的教授,也有金融、IT行业的英才;有默默奉献、矢志报国的科技将军,也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才;有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授,也有首批获得新中国博士学位的中年学者……在母校五十周年华诞之际,他们通过著书立说的独特方式,向母校献礼,其深情厚意,令人感佩!

近年来,学校组织了一系列关于中国科大办学成就、经验、理念和优良传统的总结与讨论。通过总结与讨论,我们更清醒地认识到,中国科大这所新中国亲手创办的新型理工科大学所肩负的历史使命和责任。我想,中国科大的创办与发展,首要的目标就是围绕国家战略需求,培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来,我们一直遵循这一目标定位,有效地探索了科教紧密结合、培养创新人才的成功之路,取得了令人瞩目的成就,也受到社会各界的广泛赞誉。

成绩属于过去,辉煌须待开创。在未来的发展中,我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨,在坚守优良传统的基础上,不断改革创新,提高教育教学质量,早日实现胡锦涛总书记对中国科大的期待:瞄准世界科技前沿,服务国家发展战略,创造性地做好教学和科研工作,努力办成世界一流的研究型大学,培养造就更多更好的创新人才,为夺取全面建设小康社会新胜利、开创中国特色社会主义事业新局面贡献更大力量。

是为序。

2008年9月

序

在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初,水稻生产排放的 CH_4 成为全球气候变化的热点问题。当时,国际上都认为我国稻田排放的 CH_4 远高于世界其他国家。这样的观点以及人们对全球气候变化的关注给我国的水稻生产带来了很大的压力。水稻生产中排放的 CH_4 ,产生于土壤,排放到大气中。中国科学院南京土壤研究所是土壤科学的专门研究机构,对水稻土有长期的研究积累,取得了丰硕的成果,对于可能关系到水稻生产命运的稻田 CH_4 排放问题自然不能袖手旁观。于是,当时我作为研究所所长,在 1992 年组织了以中国科学院南京土壤研究所土壤圈物质循环开放研究实验室蔡祖聪、邢光熹等科研人员为主的专门研究队伍,对稻田生态系统 CH_4 排放进行系统的研究。

令人欣慰的是,当时的决策在今天有了收获。这支研究队伍经过十余年的研究,积累了大量的田间实测数据和温室、实验室培养试验结果,取得了一系列创新性的研究成果:发现了非水稻生长期土壤水分是影响水稻生长期 CH_4 排放量的关键因素,为国际上改变对稻田 CH_4 排放量不切实际的过高估算做出了独特的贡献;明确了稻田也是重要的 N_2O 排放源,但是单位氮肥的 N_2O 排放量小于旱地;证明稻田 CH_4 与 N_2O 排放存在相互消长关系。这些成果有的被写入政府间气候变化专门委员会(IPCC)的评估报告,有的成为 IPCC《国家温室气体清单指南》的一部分。以这些研究成果为基础的《中国湿地生态系统温室气体(CH_4 和 N_2O)排放规律研究》已经被国家科技部提名为 2008 年国家自然科学奖

二等奖。通过对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的系统研究,我们对稻田土壤中碳、氮循环及其 CH_4 和 N_2O 气体生成、转化和传输规律有了进一步的认识,我们的研究队伍不断壮大,在国际上产生了一定的影响。

由蔡祖聪、徐华、马静著作的《稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放》一书是中国科学院南京土壤研究所过去十余年对稻田 CH_4 和 N_2O 排放研究成果的总结。陆地生态系统碳、氮循环与温室气体排放已经成为土壤科学的重要研究内容,也是全球变化研究的重要内容。这一领域的研究不仅关系到人类社会的生存环境和发展,而且关系到各国的发展空间。全球变化的成因、发展趋势及其对人类社会发展的影响是全社会关注的热点和国际环境外交谈判的焦点。稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放研究是全球变化研究领域取得实质性进展的少数事例。该书的出版将对促进陆地生态系统碳、氮循环与温室气体排放研究产生积极的影响。

中国科学院院士,南京土壤研究所原所长



2008年9月16日

前 言

在中国科学院南京土壤研究所的安排下,我从 1992 年开始研究稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放问题。经过十余年的努力,有了一些发现和体会,于是就萌发了将这些发现和体会整理成书的想法,并列出了写作提纲。由于忙于科研任务及其他各种社会事务,这一想法始终未能付诸实施。今年恰逢中国科学技术大学五十周年校庆,约其校友出版专著,作为向学校五十华诞的献礼。徐华博士作为中国科学技术大学的校友在受邀之列,而且接受了邀请,并推荐我担任该书的第一作者。今年 3 月完成初稿,但没有时间对书稿进行认真修改和补充。上个月我的日本朋友和合作者八木一行博士让我到他工作的日本国立农业环境技术研究所访问一个月,没有给我安排任何具体的任务,才有时间完成了对书稿的最后定稿。

该项研究从一开始就在与日本国立农业环境技术研究所的合作之下进行,阳捷行博士(曾任该研究所所长)、鹤田治雄博士和八木一行博士为该项研究提供了大量帮助,无偿提供分析仪器和大量耗件。国家自然科学基金委员会自开始至今一直资助该项研究,中国科学院和设在日本的亚洲、太平洋地区全球变化研究网络(APN)也曾给予经费上的资助,该项研究还曾被列入国家科技部“973 计划”项目课题。国际合作和国内各政府部门的经费资助为项目的顺利进行和取得成果提供了保障。

大量的国内外学者参加了该项研究。中国科学院南京土壤研究所邢光熹研究员始终负责该项目中关于稻田生态系统 N_2O 排放方面的研

究,为明确稻田生态系统是大气 N_2O 的重要排放源,但 N_2O 排放系数小于旱地这一重要结论做出了卓越的贡献。日本国立农业环境技术研究所阳捷行博士、鹤田治雄博士和八木一行博士与我们合作研究至今。美国农业部土壤与植物营养研究室的 Arvin Mosier 博士及设立于泰国 Chulalongkorn 大学的东南亚 START 地区中心、菲律宾国际水稻研究所的科研工作者曾一起参与研究。颜晓元、康国定、贾仲君、王连峰等作为博士研究生参与了该项研究,书中大量地引用了他们博士论文的内容和以博士论文内容发表的论文中的结果。今天仍然有一支包括硕士和博士研究生的研究队伍在继续进行着研究。如果没有他们贡献的聪明才智,就不可能有该书的大量第一手资料。衷心地感谢他们为该项研究做出的贡献。

该书大量地引用了国内外研究组在稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放研究中取得的成果和他们文章中的图、表,在此一并致谢。

在国内外科科研工作者的共同努力之下,稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放研究取得了很大的进展,改变了二十年前形成的一些不正确的观点。但是,在宏观尺度上的研究还没有取得实质性突破,为决策者提供清晰、明了的决策依据还有很长的路要走。本书以介绍本项目组的研究成果为主,尽可能多地结合国内外其他研究者在这一领域中取得的研究成果。受限于专业背景,加上成书于仓促之间,书中难免还存在着错误和不如意之处,如有读者发现,敬请指正。

蔡祖聪

定稿于日本筑波观音台

2008年9月15日

目 次

总序	i
序	iii
前言	v
第 1 章 全球气候变化	1
1.1 全球气候变暖	1
1.1.1 气候变化	2
1.1.2 全球气候变暖的事实	3
1.1.3 全球气候变暖的影响	4
1.1.4 全球气候变暖的原因	7
1.2 温室气体	9
1.2.1 温室效应	10
1.2.2 温室气体	11
1.2.3 大气中主要温室气体的浓度变化	13
1.2.4 温室气体对全球变暖的贡献	15
1.2.5 《京都议定书》	16
1.3 大气 CO ₂ 、CH ₄ 以及 N ₂ O 的源和汇	17
1.3.1 大气 CO ₂ 收支	17
1.3.2 大气 CH ₄ 的源和汇	19
1.3.3 大气 N ₂ O 的源和汇	28
第 2 章 稻田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的基本过程	33
2.1 稻田生态系统 CH ₄ 排放的基本过程	33

2.1.1	CH ₄ 的产生过程	34
2.1.2	CH ₄ 的氧化过程	35
2.1.3	CH ₄ 的传输过程	39
2.2	稻田生态系统 N ₂ O 排放的基本过程	40
2.2.1	N ₂ O 的产生过程	41
2.2.2	N ₂ O 的转化过程	47
第3章	稻田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的研究方法	58
3.1	稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量测定方法	58
3.1.1	箱法	59
3.1.2	微气象学方法	66
3.1.3	土壤空气浓度分析法	68
3.2	稻田 CH ₄ 生成能力测定方法	68
3.2.1	N ₂ 连续冲洗法	69
3.2.2	抽真空法	69
3.3	稻田 CH ₄ 产生途径相对贡献研究方法	70
3.3.1	碳同位素示踪技术	71
3.3.2	甲烷产生途径抑制剂方法	72
3.3.3	稳定性碳同位素法	72
3.4	稻田 CH ₄ 氧化率研究方法	78
3.4.1	甲烷产生—排放差值法	78
3.4.2	甲烷氧化抑制剂法	80
3.4.3	稳定性碳同位素自然丰度方法	81
3.5	土壤反硝化势和硝化势的测定方法	84
3.5.1	反硝化势的测定方法	84
3.5.2	硝化势的测定方法	85
3.6	硝化和反硝化作用对 N ₂ O 排放相对贡献的研究方法	86
3.6.1	硝化和反硝化抑制剂法	87
3.6.2	¹⁵ N 示踪法	88
3.6.3	气压过程区分方法	89
3.7	稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 传输途径研究方法	90
3.7.1	植株通气组织排放 CH ₄ 和 N ₂ O 的测定方法	91
3.7.2	气泡途径 CH ₄ 和 N ₂ O 排放量的测定方法	92

3.7.3 水稻生长期液相扩散途径 CH_4 和 N_2O 排放量的测定	
方法	92
3.8 土壤溶解和闭蓄态 CH_4 和 N_2O 的采样方法	92
3.8.1 注射器采样	93
3.8.2 土壤溶液采样器采样	93
3.8.3 土柱采样	94
3.9 气体样品 CH_4 和 N_2O 浓度分析方法	95
3.9.1 气体样品中 CH_4 浓度的气相色谱分析方法	95
3.9.2 气体样品中 N_2O 浓度的气相色谱分析方法	96
第 4 章 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放的影响因素	105
4.1 稻田 CH_4 排放的影响因素	106
4.1.1 土壤性质	106
4.1.2 土壤水管理	116
4.1.3 耕作轮作制	121
4.1.4 有机肥的施用	123
4.1.5 氮肥的施用	130
4.1.6 大气 CO_2 浓度增加	136
4.1.7 气候因素	140
4.1.8 水稻植株生长及品种	142
4.2 水稻土 CH_4 氧化能力的影响因素	144
4.2.1 CH_4 浓度	145
4.2.2 氧的供应	146
4.2.3 水稻植株	147
4.2.4 氮肥施用	149
4.2.5 土壤水分含量	151
4.2.6 土壤温度	154
4.3 稻田 N_2O 排放的影响因素	155
4.3.1 土壤通气性	155
4.3.2 土壤水分状况	156
4.3.3 氮肥的施用	161
4.3.4 有机肥的施用	168
4.3.5 种植制度	173

X	目次
4.3.6	脲酶/硝化抑制剂施用 174
4.3.7	土壤类型和质地 180
4.3.8	作物种植 181
4.3.9	土壤 pH 值 183
4.3.10	土壤温度 184
第 5 章	稻田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放基本过程的变化规律 205
5.1	稻田土壤 CH ₄ 产生能力的时间变化 205
5.2	稻田土壤 CH ₄ 产生途径的季节变化 209
5.3	稻田 CH ₄ 氧化率的季节变化 215
5.4	稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 的传输规律 221
5.4.1	水稻植株通气组织 222
5.4.2	气泡 226
5.4.3	液相扩散 227
第 6 章	稻田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的时空变化 233
6.1	CH ₄ 和 N ₂ O 排放的昼夜变化 233
6.1.1	CH ₄ 排放通量的昼夜变化 234
6.1.2	N ₂ O 排放通量的昼夜变化 240
6.1.3	测定时间的选择和排放通量的校正 243
6.2	CH ₄ 和 N ₂ O 排放的季节变化 245
6.2.1	常年淹水稻田 CH ₄ 排放通量的季节变化 245
6.2.2	非水稻生长期排水稻田 CH ₄ 排放通量的季节变化 249
6.2.3	水稻生长期 N ₂ O 排放通量的季节变化 255
6.2.4	非水稻生长期 N ₂ O 排放通量的季节变化 259
6.3	CH ₄ 和 N ₂ O 排放的年际变化 261
6.4	CH ₄ 和 N ₂ O 排放的空间变化 263
6.4.1	试验小区或田块尺度 CH ₄ 排放的空间变化 264
6.4.2	全国尺度 CH ₄ 排放的空间变化 267
6.4.3	N ₂ O 排放的空间变化 270
6.5	CH ₄ 和 N ₂ O 排放的相互消长规律 276
第 7 章	稻田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放量估算 287
7.1	稻田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放量估算方法 287
7.1.1	IPCC 稻田 CH ₄ 排放量估算 288

7.1.2	以田间测定数据为基础的面积扩展方法	292
7.1.3	采用转化系数估算稻田 CH_4 和 N_2O 排放量	294
7.1.4	模型估算	300
7.1.5	全球和中国稻田 CH_4 排放量估算值	305
7.2	中国稻田生态系统 CH_4 排放量及其时空变化	310
7.2.1	WinSM 模型	310
7.2.2	全国稻田 CH_4 排放量时间变化	318
7.2.3	全国稻田 CH_4 排放量空间分布	322
7.3	中国稻田生态系统 N_2O 排放量估算	327
7.3.1	区域面积扩展法	329
7.3.2	单位氮肥 N_2O 排放系数法	330
7.3.3	模型估算	333
7.4	研究展望	334
第 8 章	稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放的减缓对策	346
8.1	水分管理	348
8.1.1	水稻生长期水分管理	348
8.1.2	非水稻生长期水分管理	353
8.2	肥料管理	356
8.2.1	沼气发酵	356
8.2.2	秸秆还田方式	357
8.2.3	秸秆还田时间	358
8.2.4	无机肥管理	359
8.3	农学措施	361
8.3.1	常年淹水稻田垄作	361
8.3.2	耕作强度和轮作	363
8.3.3	种植技术	364
8.3.4	水稻品种	364
8.4	研制和应用抑制剂	365
8.4.1	甲烷抑制剂	365
8.4.2	脲酶抑制剂和硝化抑制剂	366
8.5	研究展望	367

第 1 章 全球气候变化

水稻生产是世界上最重要的粮食生产之一,也是一种最可持续的农业利用方式(Greenland, 1998)。考古发现我国种植水稻的历史至少可以追溯到公元前四千年(丁金龙, 2004)。然而,随着全球气候变化的日益加剧,20 世纪 80 年代初,研究发现稻田生态系统是大气温室气体 CH_4 的重要来源,由此引发了在世界范围内对稻田生态系统 CH_4 排放的研究。随后发现,稻田生态系统也是大气温室气体 N_2O 的重要排放源(Cai et al., 1997)。所以,在讨论稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放之前,首先概要地介绍全球气候变化及其成因、对生态系统和人类社会发展的影响及人类为减缓全球气候变化所采取的措施。

1.1 全球气候变暖

人类自诞生之日起,就生活在两个世界里:一个是由土地、空气、水和动植物组成的自然世界,这个世界在人类出现前几十亿年就已经存在了,人类出现以后也成为其中的一个组成部分;另一个是人类用双手建立起来的社会结构和物质文明的世界。在后一个世界里,人类用自己制造的工具和机器、自己的科学发明以及自己的设想,来创造一个符合人类理想和意愿的环境(芭芭拉·沃德, 1997)。

然而,在这个人类用双手建立起来的物质文明的世界里,由于资源的不合理开发利用或进行大型工程建设,自然环境和资源遭到了各种各样的破

坏,进而引起了一系列环境问题,如植被破坏引起的水土流失、过度放牧引起的草原退化、乱采滥捕造成的珍稀物种灭绝等。由此造成的环境问题给人类社会的持续发展带来了很大的威胁。这些问题的解决往往需要很长的时间,有的甚至不可逆转(曲格平,1999)。工业革命之后,人与自然环境的关系进一步发生巨大变化,特别是在第二次世界大战后短短的几十年历程中,环境问题迅速从地区性问题发展成为波及世界各国的全球性问题,从而成为国际社会关注的热点,如全球气候变暖、臭氧层破坏、森林破坏与生物多样性减少、大气及酸雨污染、土地荒漠化、国际水域与海洋污染、有毒化学品污染和有害废物越境转移等。

在上述各种全球性问题中,气候变暖是一个最典型的全球尺度的环境问题。20世纪70年代,科学家把气候变暖作为一个全球环境问题提了出来。到了80年代,随着对人类活动和全球气候关系认识的深化,以及几百年来最热天气的出现,这一问题开始成为国际政治和外交谈判的议题。1992年6月3日,联合国在巴西的“里约中心”组织召开联合国环境与发展大会,通过并开放签署《气候变化框架公约》。从此,全球气候变暖问题直接涉及经济发展方式及能源利用的结构与数量,正在成为深刻影响21世纪全球发展的一个重大国际问题。

1.1.1 气候变化

从狭义上讲,气候通常是指天气的平均状况,也可以更严格地表述为:在某个时期内,对相关量的均值和变率做出的统计描述。这里,一个时期的长度可以从几个月到几十年或者更长,世界气象组织(WMO)通常将这一时期的长度定义为30年。相关量一般指地表变量,如温度、降水和风等。从广义上讲,气候就是气候系统的状态,包括统计上的描述(IPCC, 2007a)。

所谓气候变化是指气候状态的变化,我们可以通过其特征的平均值和/或变率的变化对气候状态是否发生变化加以判别(如运用统计检验),气候状态的变化能够持续一段时期,通常为几十年或更长的时间。其原因可能是由于自然界的内部过程或外部强迫,或是由于人类活动所造成的大气成分和土地利用的变化。《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)第一条将气候变化定义为“在特定时期内所观测到的在自然气候变率之外的直接或间接归因于人类活动改变全球大气成分所导致的气候变化”。因此,UNFCCC将可归因于人类活动改变大气成分后的“气候变化”与可归因于