



温室气体减排与控制技术丛书

WENSHI QITI JIANPAI YU KONGZHI JISHU CONGSHU

农林业温室气体减排 (与) 控制技术

NONGLINYE WENSHI QITI JIANPAI
YU KONGZHI JISHU

唐红侠 韩丹 赵由才 等编



化学工业出版社



温室气体减排与控制技术丛书

WENSHI QITI JIANPAI YU KONGZHI JISHU CONGSHU

农林业温室气体减排 与控制技术

NONGLINYE WENSHI QITI JIANPAI
YU KONGZHI JISHU

唐红侠 韩丹 赵由才 等编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍了农业和林业领域温室气体的减排和控制,全书共分为5章。第1章介绍温室气体的概况;第2章主要介绍了与陆地生态系统和碳循环有关的概念以及研究陆地生态系统碳循环有力的武器——陆地生态系统碳循环模型;第3章分别介绍了森林植被碳库和森林土壤碳库以及土地利用变化对碳库的影响,从而给出了森林生态系统中温室气体的有效减排措施;第4章分别从旱田、水田及土地利用的变化来分析温室气体的产生,从而给出了与农业相关的温室气体的有效减排措施;第5章介绍了与湿地有关的温室气体产生及减排措施,以三江平原为典型代表进行分析。

本书适合于从事环境工程温室气体和减排工作的研究人员参考,同时也适合于环保部门的工作人员及相关专业研究人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

农林业温室气体减排与控制技术/唐红侠等编. —北京:
化学工业出版社, 2009.1
(温室气体减排与控制技术丛书)
ISBN 978-7-122-03858-6

I. 农… II. 唐… III. 有害气体-大气扩散-污染防治
IV. X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 158452 号

责任编辑: 徐 娟

文字编辑: 刘莉娟

责任校对: 郑 捷

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷: 北京云浩印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张10¼ 字数194千字 2009年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

温室气体减排与控制技术丛书

编辑委员会

主 任 赵由才

副主任 王 星

委 员 赵由才 王 星 韩 丹 唐红侠 梅 娟
李 明 蒋家超 赵天涛 阎 宁

近百年来，全球气候正在发生以变暖为主要特征的显著变化。人类社会生产生活引起的温室气体排放是全球气候变暖的主要原因，大面积的森林砍伐和草原破坏等土地利用变化加剧了全球气候变暖的进程。随着全球气候变化问题越来越成为全球共同关注的热点，共同应对气候变化的全球性合作步伐正在逐渐加快。1992年里约环境与发展大会以来，国际社会先后制定了《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》、《波恩协定》、《布宜诺斯艾利斯行动计划》、《马拉喀什协定》和《德里宣言》等一系列重要文件，这些文件在加强全球共识和减缓全球气候变化的过程中发挥了关键作用。

《联合国气候变化框架公约》于1994年3月21日生效，是目前国际环境与发展领域中影响最大、涉及面最广、意义最为深远的国际法律文书。目前，世界上绝大部分国家已经成为《联合国气候变化框架公约》缔约方。1992年6月11日，中国政府签署了《联合国气候变化框架公约》。《联合国气候变化框架公约》的目标是“将大气中温室气体的浓度稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平上”，同时明确规定发达国家与发展中国家之间负有“共同但有区别的责任”。发达国家对气候变化负有主要的历史和现实的责任，理应率先承担应对气候变化的义务，而发展中国家的首要任务是发展经济与消除贫困。公约缔约方会议（COP）是《联合国气候变化框架公约》的最高机构，1995年第一次公约缔约方会议（COP1）至2004年第十次公约缔约方会议（COP10）共举行了10届。1997年12月1日至11日，第三次公约缔约方会议（又称“京都会议”）在日本京都举行，这次会议制定了《京都议定书》。《京都议定书》中确定了联合履行（JI）、清洁发展机制（CDM）和国际排放权交易（IET）三种帮助发达国家实现温室气体减排目标的灵活机制，三种机制的核心在于发达国家可以通过这三种机制在本国以外的地区取得减排的抵消额，从而以较低的成本实现减排目标。

上述三种机制中与发展中国家直接相关的是清洁发展机制（CDM）。其主要内容是指发达国家通过提供资金和技术的方式，与发展中国家开展项目级的合作，在发展中国家进行既符合可持续发展政策要求，又产生温室气体减排效果的项目投资，由此获取投资项目所产生的部分和全部减排额度，作为其履行减排义务的组成部分。

清洁发展机制在我国开展不久，许多方面的实施尚处于起步阶段。近年来，我国各级政府、相关部门对清洁发展机制做了大量研究工作，取得了一定的成效，积

累了大量的经验和教训。然而，国内外相关资料比较分散，读者难以深入了解和掌握。

温室气体控制技术的发展历史不长，有关技术的研发与应用还处于初始阶段。近年来，对清洁发展机制、甲烷收集发电、瓦斯收集利用、新能源汽车、温室效应材料替代物等研发越来越多，但对二氧化碳的控制与利用的研发仍然极其有限。我们认为，温室效应不仅仅是气温升高、海平面上升的问题，而且还可能是湖泊、海洋、河流等的水质恶化，生物多样性下降，人类疾病种类增加等的主要原因之一。

就温室气体减排与控制工程来看，近期应加强甲烷、二氧化碳等大宗气体的回收、利用、减量、控制。对发电厂、炼钢厂、供暖锅炉、化工厂等排放二氧化碳大户，可考虑就近排入江河湖海（甚至排入下水道），充分利用这些消纳水体对二氧化碳的化学吸收转化容量；对小规模二氧化碳排放单位，可考虑就地分离回收、回用或排入下水道。甲烷的化学吸收难度稍大，但其生物氧化却远比二氧化碳容易，因此，可考虑甲烷的生物氧化。未来若干年，国内外对温室气体的减排与控制技术的研发和应用将越来越重视。当然，这些工程应用建议还需要大量研发和工程实践以进一步完善。

本丛书包括五本，全面系统地描述了温室效应控制的有关政策，工业与能源行业、农林业、交通业、环境保护类行业在温室气体减排方面的发展近况以及各行业在温室气体排放、节能减排方面的方针政策、减排技术，同时对清洁发展机制的操作规程、清洁发展机制开发和实施的基本流程与方法学以及清洁发展机制在各行业内的应用案例做了详细的介绍。

赵由才

2008年8月于同济大学

前言

自从工业革命以来，由于车辆、工厂、电厂等大量燃烧化石燃料而引起的温室气体的大量排放（增源），以及由于土地利用、土地利用变化（如围湖造田、毁林开荒）、大规模的森林采伐等诸多人类活动而导致温室气体正常的排放去路被切断（减汇），使得大气中温室气体的含量较工业革命前的含量大大增加。

为了减少全球气候变暖和海平面上升等危险，1997年12月在日本东京的第三次缔约方大会上形成了关于限制CO₂排放量的成文法案——《京都议定书》。《京都议定书》规定工业化国家要减少温室气体的排放，而发展中国家没有减排义务，《联合国气候变化框架公约》规定在第一个承诺期（2008~2012年）内，相对于1990年的温室气体排放量，全世界总体排放量要减少5.2%。在减排措施上，该议定书规定了三种机制：联合履行（JI）、清洁发展机制（CDM）、国际排放权交易（IET）。其中与发展中国家有关的是清洁发展机制（CDM），是发达国家和发展中国家双赢的机制。其核心是促进发达国家和发展中国家基于减排项目进行减排的合作，从而以成本最有效的方式实现全球减排的目标。CDM项目包括减排项目和碳汇项目。减排项目主要是通过改善能源利用效率，采用替代性或可更新能源等项目活动来减少温室气体排放；碳汇项目目前仅限于造林和再造林项目，是指发达国家通过在发展中国家投资造林和再造林项目，以实现其减排温室气体的义务。我国在第一个承诺期（2008~2012年）内，虽然不承担减排义务，但是随后我国将面临着CO₂减排的巨大压力，所以必须对温室气体的减排和碳汇项目进行研究。

陆地生态系统作为非常重要的温室气体的来源和温室气体的消耗去处，在全球碳循环中起到很重要的作用，对其展开研究有利于减少其排放温室气体的量以及增大其吸收温室气体的能力，从而更有效地实现温室气体的减排。

陆地生态系统主要包括森林、农田、湿地等生态系统类型。因为陆地生态系统本身的复杂性（植被的种类、结构等），加上陆地生态系统还包含了巨大的土壤碳库以及测量精度和计算方法等原因，使得陆地生态系统的碳储量计算结果具有很大的不确定性，导致陆地生态系统碳循环计算不准确，从而影响到对温室气体估算，

以至于出现“碳失汇”现象。这对于我们正确认识陆地生态系统碳循环和温室气体的减排极为不利，故应进行研究。

参加本书编写的人员有：唐红侠、赵由才（1.1，1.3，2.2，2.3），陈瑜（1.2，2.1），韩丹、赵由才（3.4～3.7，第4章，5.2、5.3、5.5），洪飞宇（3.1～3.3），代学民（5.1、5.4、5.5）。

欢迎读者在使用本书的过程中就相关内容提出宝贵意见和建议，以便我们在以后的工作中加以修订。

编者

2008年8月

目录

第 1 章 温室气体概况	1
1.1 温室气体	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 主要温室气体	3
1.2 温室效应	7
1.3 中国 1990 年温室气体状况	10
1.3.1 能源来源	10
1.3.2 工业来源	11
1.3.3 农业来源	11
1.3.4 森林来源	11
1.3.5 废物来源	11
第 2 章 陆地生态系统中的碳循环	12
2.1 陆地生态系统碳循环的相关概念	13
2.1.1 概述	13
2.1.2 相关概念	14
2.2 陆地生态系统碳循环模型简介	23
2.2.1 生产力模型	23
2.2.2 植被生态系统碳循环模型	25
第 3 章 林业温室气体与减排	32
3.1 概述	32
3.2 森林生物碳库	33
3.2.1 森林生物固碳分析	34
3.2.2 森林生物碳库估算方法	35
3.3 森林土壤碳库	42
3.3.1 森林土壤碳库分布及储量	43
3.3.2 森林土壤碳储量主要估算方法	43
3.4 不同森林类型及生长阶段碳储量的变化	47
3.5 森林对温室气体的影响	48
3.5.1 森林土壤碳释放（土壤呼吸）	48
3.5.2 通过森林生物产生的间接影响	53

3.5.3	对土壤有机碳含量的影响·····	54
3.5.4	林业土地利用改变与管理对温室气体的影响·····	54
3.6	温室气体对林业的影响·····	61
3.6.1	对土壤呼吸的影响·····	61
3.6.2	对森林分布和生产力的影响·····	65
3.6.3	对碳循环的影响·····	66
3.6.4	对森林植物的生理生态影响·····	67
3.7	林业政策·····	68
3.7.1	政策建议·····	68
3.7.2	技术对策·····	69
第4章	农业中温室气体及减排 ·····	74
4.1	农业生态系统中碳的动态规律及碳减排·····	74
4.1.1	农业生态系统的碳库及碳循环·····	74
4.1.2	农业生态系统的碳平衡·····	75
4.1.3	农业生态系统碳减排的影响因素·····	77
4.2	农田生态系统温室气体测定方法·····	78
4.2.1	箱法·····	78
4.2.2	微气象学法·····	80
4.3	稻田生态系统主要温室气体的排放·····	81
4.3.1	排放机理及排放规律研究·····	81
4.3.2	区域稻田 CH ₄ 排放的估算·····	85
4.3.3	影响稻田 CH ₄ 排放的因素·····	89
4.4	旱田生态系统主要温室气体的排放·····	91
4.4.1	N ₂ O 排放源及其产生·····	91
4.4.2	N ₂ O 排放的影响因素·····	93
4.4.3	对农田 N ₂ O 排放量的估算·····	95
4.4.4	旱田生态系统 CO ₂ 的排放·····	95
4.5	农业生产废弃物及饲养业对温室气体排放的贡献·····	96
4.5.1	农业生产废弃物温室气体的排放·····	96
4.5.2	反刍动物 CH ₄ 排放·····	96
4.6	减缓农业生产对温室气体排放的具体措施·····	100
4.6.1	CH ₄ ·····	100
4.6.2	N ₂ O·····	102
4.6.3	CO ₂ ·····	102
第5章	湿地中温室气体及减排 ·····	104
5.1	湿地概述·····	104

5.1.1 湿地的定义 105

5.1.2 湿地的类型 106

5.1.3 湿地的生态性质 109

5.1.4 湿地的功能 112

5.1.5 中国湿地的分布 114

5.2 湿地生态系统中碳的动态规律和温室气体排放 115

5.2.1 湿地生态系统碳的动态规律 116

5.2.2 湿地生态系统甲烷的产生 119

5.2.3 影响湿地 CH₄ 排放的因素 121

5.2.4 湿地 N₂O 的排放 124

5.3 芦苇湿地温室气体减排 125

5.3.1 芦苇湿地 CH₄ 的产生及排放 125

5.3.2 芦苇湿地 CH₄ 排放的动态规律 126

5.3.3 影响排放的因素及应对措施 127

5.4 湿地保护与温室气体 128

5.4.1 湿地资源保护成为温室气体减排增汇途径的国际趋势 128

5.4.2 我国湿地保护与应对气候变化的国家需求 129

5.4.3 我国湿地土壤碳库变化与湿地保护 130

5.5 实例——三江平原 134

5.5.1 三江平原自然资源概况 134

5.5.2 三江平原淡水沼泽湿地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放特征 135

5.5.3 三江平原岛状林 CH₄ 和 N₂O 排放特征 136

5.5.4 三江平原湿地的存在的主要问题 138

5.5.5 三江平原湿地可持续对策 139

参考文献 141

第 1 章 温室气体概况

大气中 CO_2 和其他温室气体浓度升高导致气候变化——气候变暖是国际社会公认的全球性环境问题，受到人类社会的共同关注，是当今人类面临的最严峻的挑战之一，引起了一系列的环境变化。造成大气中温室气体浓度的不断急剧上升、持续增加的主要原因是工业革命以来人类活动的干扰越来越大。

1.1 温室气体

1.1.1 概述

温室气体 (Greenhouse Gas, GHG) 或温室效应气体是指大气中能促成温室效应的气体成分。温室气体在大气层中的份额不足 1%。其总浓度取决于各源和汇的平衡结果。源是指某些化学或物理过程致使温室气体浓度增加；相反，汇是令其减少。部分温室气体自然存在于大气中，另外一些是人为活动造成的，例如化石燃料的燃烧、大规模的森林砍伐以及土地利用变化等。故人类活动可直接影响各种温室气体的源和汇，进而改变温室气体的浓度。

温室气体包括水汽 (H_2O)，水汽所产生的温室效应大约占整体温室效应的 60%~70%，大气层中的水汽 (H_2O) 虽然是“天然温室效应”的主要原因，但普遍认为它的成分并不直接受人类活动的影响；其次是二氧化碳 (CO_2 , Carbon dioxide)，大约占 26%；其他还有臭氧 (O_3 , Ozone)、甲烷 (CH_4 , Methane)、一氧化二氮 (N_2O , Nitrous oxide)、氯氟碳化合物 (CFCs, Chlorofluorocarbons)、全氟碳化合物 (PFCs, Perfluorocarbons)、氢氟碳化合物 (HFCs, Hydrofluorocarbons)、氯氟烃 (HCFCs, Hydrochlorofluorocarbons)、全氟碳化合物 (PFCs, Perfluorocarbons) 及六氟化硫 (SF_6 , Sulphur hexafluoride) 等。其中，臭氧比较特殊，当臭氧处在大气层较低的部位时，比如在对流层和同温层的下部，是一种温室气体，而处于同温层的上部（此处有一层臭氧层）时，它可以吸收太阳光中的紫外线。对流层中的臭氧是仅次于 CO_2 、 CH_4 的重要的温室气体，它是光化学产物，其丰度受 CH_4 、一氧化碳 (CO)、氮氧化物 (NO_x) 和挥发性有机物 (VOC) 的排放量控制。将来若 CH_4 的丰度增加 1 倍， CO 和 NO_x 增加 3 倍，对流层中臭氧的丰度将增加 50%。

各种温室气体对地球的能量平衡影响程度并不相同。为了帮助人们比较各种温

室气体对地球变暖的影响，政府间气候变化专业委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）在 1990 年的报告中给出了全球增温潜能（Global Warming Potential, GWP）的概念。全球增温潜能是反映温室气体对地球变暖作用的相对强度，定义为单位质量的温室气体在一定时间内相对于 CO₂ 的累积辐射力。辐射力是由于太阳或红外线辐射分量的转变而引起对流层顶部的平均辐射改变。辐射力影响地球吸收辐射和释放辐射间的平衡，正辐射力会使地球表面变暖，负辐射力使地球表面变冷。表 1-1 列出政府间气候变化专业委员会（IPCC）报告中的一些温室气体的全球增温潜能。对气候变化的影响来讲，全球增温潜能指数已经考虑到各温室气体在大气层中的存留时间以及其吸收辐射的能力。计算全球增温潜能时需要了解各温室气体在大气层中的演变情况和它们在大气层的余量所产生的辐射力。因此，全球增温潜能含有一些不确定因素，以 CO₂ 作为相对比较，一般在 ±35% 左右。

表 1-1 温室气体的特征及全球增温潜能

温 室 气 体 种 类		留存期/年	全球增温潜能		
			20 年	100 年	500 年
二氧化碳(CO ₂)		未能确定	1	1	1
甲烷(CH ₄)		12	62	23	7
一氧化二氮(N ₂ O)		114	275	296	156
氯氟碳化合物(CFCs)	CFC1 ₃ (CFC-11)	45	6300	4600	1600
	CF ₂ Cl ₂ (CFC-12)	100	10200	10600	5200
	CClF ₃ (CFC-13)	640	10000	14000	16300
	C ₂ F ₃ Cl ₃ (CFC-113)	85	6100	6000	2700
	C ₂ F ₄ Cl ₂ (CFC-114)	300	7500	9800	8700
	C ₂ F ₅ Cl (CFC-115)	1700	4900	7200	9900

注：排放 1kg 该种温室气体相对于 1kgCO₂ 所产生的温室效应（数据来自政府间气候变化专门委员会第三份评估报告，2001）。

从表 1-1 可以看出，在百年的时间尺度上单位质量 CH₄ 和 N₂O 的全球增温潜能分别是 CO₂ 的 23 倍和 296 倍，而氯氟碳化合物（CFCs）的全球增温潜能则更加巨大，达到了 4600~14000。而且有些温室气体随着时间的增加，全球增温潜能越来越低，比如 CH₄ 和 N₂O 等；而另外一些却有相反的趋势，C₂F₅Cl 则随着时间的增加，全球增温潜能越来越强。

直接受人类活动影响的几种温室气体中，CO₂、CH₄ 和 N₂O 被认为是最重要的温室气体。其中 CO₂ 是数量最多，且对增强温室效应的贡献最大的气体，其目前的排放量对全球变暖的贡献率超过 50%，它产生的增温效应占所有温室气体总增温效应的 63%，无疑是最重要的温室气体，在大气中存留时间最长可达约 200 年；其次是 CH₄，贡献约占 19%；再次是 N₂O，贡献约占 4%。

研究表明，大气中 CH₄ 的丰度不断增加，从 1978 年的 1520 × 10⁻⁹ 增加到

1998 年的 1745×10^{-9} 。然而，经过最近二十多年的观测，其结果表明： CH_4 每年的增加速率在降低。大气中 CH_4 的增加具有很大的不确定性，比如 1992 年的增加量近乎为零，而 1998 年竟然增加了 13×10^{-9} 。对这种不确定性还没有定量的解释。大气中的 N_2O 在以每年 0.25% 的速度增加。

1.1.2 主要温室气体

这里我们主要讨论几种最重要的受人类活动影响最大的温室气体： CO_2 、 CH_4 、 N_2O 以及 CFCs 等。表 1-2 列出了几种主要温室气体的特征。

表 1-2 几种主要温室气体的特性

温 室 气 体	源	汇	对气候的影响
二氧化碳(CO_2)	1)燃料 2)改变土地的使用 (砍伐森林)	1)被海洋吸收 2)植物的光合作用	吸收红外线辐射,影响大气平流层中 O_3 的浓度
甲烷(CH_4)	1)生物体的燃烧 2)肠道发酵作用 3)水稻	1)和 $\text{HO}\cdot$ 起化学作用 2)被土壤内的微生物吸取	吸收红外线辐射,影响对流层中 O_3 及 $\text{HO}\cdot$ 的浓度,影响平流层中 O_3 和 H_2O 的浓度,产生 CO_2
一氧化二氮(N_2O)	1)生物体的燃烧 2)燃料 3)化肥	1)被土壤吸取 2)在大气平流层中被光线分解及和 $\text{HO}\cdot$ 起化学作用	吸收红外线辐射,影响大气平流层中 O_3 的浓度
臭氧(O_3)	光线令 O_2 产生光化作用	与 NO_x 、 ClO_x 及 HO_x 等化合物的催化反应	吸收紫外光及红外线辐射
一氧化碳(CO)	1)植物排放 2)人工排放(交通运输和工业)	1)被土壤吸取 2)和 $\text{HO}\cdot$ 起化学作用	影响平流层中 O_3 和 $\text{HO}\cdot$ 的循环,产生 CO_2
氯氟碳化物(CFCs)	工业生产	在对流层中不易被分解,但在平流层中会被光线分解和与 O 产生化学作用	吸收红外线辐射,影响平流层中 O_3 的浓度
二氧化硫(SO_2)	1)火山活动 2)煤及生物体的燃烧	1)干和湿沉降 2)与 $\text{HO}\cdot$ 产生化学作用	形成悬浮粒子而散射太阳辐射

1.1.2.1 二氧化碳 (CO_2)

CO_2 是数量最多、对增强温室效应的贡献最大的气体。

在工业革命以前的几千年的时间里，大气 CO_2 浓度始终维持在 $(280 \pm 10) \times 10^{-6}$ 左右；工业革命以后其浓度开始持续上升。夏威夷的冒纳罗亚观象台在 1958 年已开始对大气层 CO_2 浓度做了仔细测量，结果显示 CO_2 在大气层中的每年平均浓度由 1958 年约 315×10^{-6} （体积）升至 1997 年约 363×10^{-6} （体积）。在 20 世纪里，大气 CO_2 的增加速度是空前的。

冒纳罗亚观象台观测结果还表明：每年在北半球因为植物呼吸作用 CO_2 浓度会

产生周期性变化，在秋冬季时 CO_2 浓度增加；而在春夏季时 CO_2 浓度减少。与北半球比较，这种随着植物生长及凋萎的 CO_2 浓度周年变化在南半球的出现时间刚刚相反，而且变化幅度较小，这种现象在赤道附近地区则完全看不到。

目前大气 CO_2 的增加主要是来自人类活动引起的排放。排放清单的 3/4 是由于化石燃料燃烧引起的。1980~1989 年间化石燃料燃烧（加上水泥生产产生的）释放的 CO_2 量平均为 $(5.4 \pm 0.3) \text{PgC/a}$ ($1 \text{Pg} = 10^{15} \text{g}$)；1990~1999 年释放的 CO_2 量平均为 $(6.3 \pm 0.4) \text{PgC/a}$ 。其余的释放主要是由土地利用变化造成的。

1980~1989 年间大气 CO_2 含量的增加速度是 $(3.3 \pm 0.1) \text{PgC/a}$ ；1990~1999 年间大气 CO_2 含量的增加速度是 $(3.2 \pm 0.1) \text{PgC/a}$ 。显然大气中 CO_2 的增加速度比碳源排放 CO_2 的速度小，这是因为排放的 CO_2 中的一部分被溶解到海洋中，还有一部分 CO_2 被陆地生态系统吸收。另外，不同年份也表现出不同的增加速度。例如，1957 年以来就开始对大气 CO_2 进行测量，从测量结果看：1992 年的增加速度比较低，为 1.9PgC/a ；1998 年的增加速度达到最高，为 6.0PgC/a 。这主要是由于陆地和海洋对 CO_2 吸收发生变化而造成的。

有统计表明，大气 CO_2 增加速度高的年份一般出现在厄尔尼诺 (El Niño) 年，而增加速度低的年份一般出现在厄尔尼诺延伸年，比如 1991~1994 年。太平洋赤道带的表层海水 CO_2 测量结果表明，在厄尔尼诺事件时来自该区域的 CO_2 自然源减少 $0.2 \sim 1.0 \text{PgC/a}$ ；相反地，大气中的 CO_2 增加。在大多数厄尔尼诺事件中大气 CO_2 高速增加的可能解释是陆地生态系统吸收的减少，多余部分的 CO_2 引起了热带地区陆地生态系统中的高温、干旱、火灾等效应。

地球东西方向上的大气 CO_2 浓度梯度比南北方向上 CO_2 浓度梯度小一个数量级。

1.1.2.2 甲烷 (CH_4)

甲烷 (CH_4) 气体对温室效应的贡献仅次于 CO_2 ，占温室气体对全球变暖贡献总份额的 20%，每分子 CH_4 温室增温潜力是 CO_2 的 21 倍。20 世纪 40 年代末期，Migeotte 通过太阳红外光谱观测到了大气 CH_4 ，并对其垂直分布进行了推算，是大气 CH_4 的发现者。由于人类活动的影响，自 1750 年以来，大气 CH_4 浓度在持续增长。目前大气 CH_4 在对流层的浓度约为 $1.760 \mu\text{L/L}$ ，增长速度年平均为 $0.007 \mu\text{L/L}$ 。 CH_4 在大气层中的增长速度在近十几年开始减少下来，尤其在 1991~1992 年间有明显的下降，但在 1993 年后期亦有些增长。1980~1990 年的平均增长速度是每年 13×10^{-9} 。

CH_4 主要来源于厌氧环境的生物过程，在缺氧环境中由产甲烷细菌或生物体腐败产生，一切存在厌氧环境的生态系统都是大气 CH_4 的源，为生物源，生物源产生的 CH_4 占大气 CH_4 总量的 80%；非生物过程产生 CH_4 的源称为非生物源，主要包括化石燃料的生产和使用过程的泄漏。大气中 CH_4 源也可以按照是否为人类所直接参与而分为自然源和人为源：前者主要包括湿地、白蚁、海洋等释放，一般

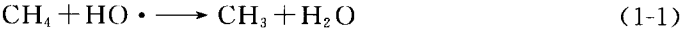
占总 CH₄ 源的 30%~50%；后者主要包括能源利用、垃圾填埋、反刍动物、稻田和生物体燃烧等释放，大约占总 CH₄ 源的 50%~70%（见表 1-3）。

表 1-3 全球 CH₄ 收支估算值

项 目		Fung 等 (1991)	Hein 等 (1997)	Lelieveld 等 (1998)	Houweling 等 (1999)	Mosier 等 (1998)	Olivier 等 (1999)	SAR	TAR
		基 准 年							
		1980	—	1992	—	1994	1990	1980	1998
自然源	湿地	115	237	225	145				
	白蚁	20	—	20	20				
	海洋	10	—	15	15				
	碳氢化合物	5	—	10	—				
人为源	能源	75	97	110	89		109		
	垃圾填埋	40	35	40	73		36		
	反刍动物	80	90	115	93	80	93		
	废物处理	—	—	25	—	14	—		
	稻田	100	88	—	—	25~54	60		
	生物体燃烧	55	40	40	40	34	23		
	其他	—	—	—	20	15			
汇	总源	500	587	600				597	598
	土壤	10	—	30	30	44		30	30
	对流层 HO· 反应	450	489	510				490	506
	向平流层输送	—	46	40				40	40
	总汇	460	535	580				560	576
	失衡	+40						+37	+22

目前全球由自然源和人为源释放的 CH₄ 分别为 160Tg/a 和 375Tg/a（1Tg=10¹²g，下同），总量为（525±125）Tg/a，但目前对单个 CH₄ 源的年排放量的估计还很不准确。天然湿地（沼泽地、浅水湖沼和苔原等）是 CH₄ 的主要源，全球天然湿地的 CH₄ 排放约占总释放量的 20%，随着全球变暖的继续，微生物活动增强，天然湿地的释放量可能会进一步加大。稻田是 CH₄ 的另一个重要源，但目前稻田 CH₄ 排放量的估计也不准确。

大气 CH₄ 的汇主要是通过 CH₄ 在大气对流层与 HO· 自由基发生化学反应被消耗而造成的 [化学反应见式(1-1)]，其次是水分未饱和土壤的吸收和少量地向平流层输送。除了大气中每年增加 30Tg CH₄ 以外，大气 CH₄ 的汇主要是与 HO· 自由基在对流层大气中的氧化反应，其量约为 470Tg/a，占总 CH₄ 汇的 87.8% 左右；少量 CH₄ 则向平流层输送，其量约为 40Tg/a，占总 CH₄ 汇的 7% 左右；以及被干燥土壤吸收，其量约为 30Tg/a，占总 CH₄ 汇的 5.2% 左右。因此，全球 CH₄ 的汇约为（560±100）Tg/a。



早在 20 世纪初人类便知道甲烷氧化细菌能够氧化 CH₄。而甲烷氧化细菌广泛

散布于土壤、沉积物以及水环境中，故土壤是大气 CH_4 的一个重要的汇。在热带、温带以及北极地区的许多研究中证实了土壤可以氧化 CH_4 。据估计，全球好气土壤所消耗的大气 CH_4 的量每年约为 30Tg，其中温带常绿阔叶林土壤的 CH_4 消耗约占土壤吸收 CH_4 总量的 37%。好气的自然土壤如森林土壤、草原土壤等都可能具有吸收大气中 CH_4 的作用，即使是冻原和沼泽土，在无水层覆盖时也具有吸收作用。

大气中 CH_4 含量的多少取决于自然和人为的 CH_4 排放与消耗间的平衡，大气 CH_4 含量持续升高是由于 CH_4 源增加和 CH_4 汇减小综合作用的结果。产 CH_4 过程与消耗 CH_4 过程在土壤中往往同时存在，土壤 CH_4 通量是两个过程的综合。

1.1.2.3 一氧化二氮 (N_2O)

大气中的一氧化二氮 (N_2O) 也是一种公认的温室气体。因为 N_2O 在大气中的存留时间可长达百年之久，并且可被输送到平流层，因此 N_2O 是一种可以导致臭氧层损耗的物质。研究表明，自工业革命以来，由于人类活动的影响，大气中 N_2O 的含量急剧增加，1990 年时已经达到 310×10^{-6} ，而且每年还以 0.2%~0.3% 的速度增加。现在对流层的 N_2O 含量在 $(312 \sim 314) \times 10^{-6}$ (体积) 左右。计算模拟结果表明，如果大气中 N_2O 含量增加一倍，全球地表气温平均将上升 0.4℃，并且使大气层中不同高度的臭氧含量减少 10%~16%。

N_2O 的排放源包括天然源和人为源。天然源包括海洋、森林和草地等；人为源指与人类活动密切相关的 N_2O 排放过程，包括农田土壤、生物质燃烧、工业排放等。

N_2O 的主要天然源为土壤排放。土壤中的硝化和反硝化作用均可产生 N_2O ，故土壤是 N_2O 的一个重要排放源。土壤中生物源 N_2O 主要是由硝化和反硝化过程产生的。简单地说，硝化是好氧的微生物将氨氧化为硝酸盐的过程，而反硝化是厌氧微生物将硝酸盐还原为 N_2 的过程。 N_2O 是由微生物细胞在这两个反应过程中释放到土壤中的中间产物。IPCC 对全球已知的 N_2O 源汇进行总结，认为全球 N_2O 排放总量为每年 16.2Tg，其中，热带森林和温带森林土壤的 N_2O -N 排放量分别为每年 3.0Tg 和 1.0Tg，二者之和约占全球 N_2O 排放总量的 24.7%，总体而言，土壤排放量约占全球 N_2O 排放源的 57%。

海洋则是 N_2O 的另一个重要的天然排放源。有专家认为海洋释放的 N_2O 主要是由亚好氧环境中的细菌通过反硝化作用产生的。而气候变暖将导致亚好氧环境的扩大，从而促进了反硝化作用的进行，故将增加海洋系统的 N_2O 的释放。最近的一些研究表明，海洋地区 N_2O 的排放量较低，特别是在厄尔尼诺现象发生时更是如此。IPCC (1997) 估计海洋源的年排放量可能在 3.0Tg N_2O -N 左右。除了在大气中每年增加 N_2O -N 3~4.5Tg 以外， N_2O 的最主要的汇是在大气中的光化学分解，陆地水体和土壤也可能吸收少量 N_2O 。

生物质燃烧包括农作物秸秆、森林、草地等的燃烧。全球因生物质燃烧而产生