



温室气体减排与控制技术丛书

WENSHI QITI JIANPAI YU KONGZHI JISHU CONGSHU

环境工程领域温室气体减排 与 控制技术

HUANJING GONGCHENG LINGYU WENSHI QITI JIANPAI
YU KONGZHI JISHU

赵天涛 阎 宁 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

环境工程领域温室气体减排 与控制技术

HUANJIANGONGCHENG LINGYU WENSHI QITI JIANPAI
YU KONGZHI JISHU

赵天涛 阎宁 赵由才 等编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是《温室气体减排与控制技术丛书》之一，主要对环境工程领域中温室气体的减排与控制技术进行阐述。书中首先在介绍温室气体对地球环境影响现状的基础上，重点讨论了环境工程领域温室气体排放和控制现状。之后介绍了废水处理过程温室气体的产生及控制，重点讨论了废水产甲烷、产氢、产酸以及废水处理过程中 N_2O 的控制技术。第3章主要针对固体废物处理和处置过程中温室气体的产生及控制，重点从填埋气利用、垃圾堆好氧填埋、餐厨垃圾厌氧发酵和固体废物的热解等技术进行阐述。第4章和第5章则分别就甲烷和二氧化碳两个最重要的温室气体介绍以温室气体去除为主要目的的环境技术以及温室气体减排的研究进展。全书最后讨论了清洁发展机制下的污染治理。

本书立意新颖，适合政府及研究机构环保工作者、大中专院校师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

环境工程领域温室气体减排与控制技术/赵天涛, 阎宁, 赵由才等编.
北京: 化学工业出版社, 2009.2

(温室气体减排与控制技术丛书)

ISBN 978-7-122-04186-9

I. 环… II. ①赵…②阎…③赵… 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 186296 号

责任编辑: 徐娟

装帧设计: 王晓宇

责任校对: 陈静

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)

印装: 北京云浩印刷有限责任公司

720mm×1000mm 1/16 印张 12¼ 字数 237 千字 2009 年 3 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: 38.00 元

版权所有 违者必究

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

环境工程是一门独特的技术学科，它所关注的主要焦点是环境污染物及其对环境的影响。现代工业社会发展至今，各种工程主要强调的是对地球资源的提取、转化、供应和使用，而很少顾及到由于这些活动及其他活动产生并排放到环境中的污染物。而环境工程的中心任务则是利用促进社会发展的科学知识来开发和应用科学技术，最大限度地减小环境介质中相关污染物所造成的不利影响。环境工程具有极强的交叉性，生物工程、化学工程、材料科学、地理地质等各个领域的新技术都为环境工程解决现实存在的环境问题提供了技术支持。

早在 19 世纪 20 年代，法国科学家 Jean Fouxier 就发现了自然温室效应，认为自然温室效应是地球能量系统平衡的重要组成部分。至 19 世纪末，瑞典科学家阿伦纽斯 (Svante Arrhenius) 又提出了人为温室效应的可能性，认为矿物燃料燃烧过程中所排放的 CO_2 将会带来气候变暖问题，即每当大气中 CO_2 浓度增加 1 倍时，气温会上升 $4\sim 6^\circ\text{C}$ 。但直至 20 世纪 70 年代末，气候变暖问题才重又引起重视。在 1985 年由联合国环境规划署 (UNEP)、世界气象组织 (WMO)、国际科学联盟理事会 (ICSU) 共同召开的国际会议上，对温室气体浓度增加将引致全球平均温度上升的观点得到基本接受，并成为国际社会的热点之一。

全球气候变暖这一不争的事实说明温室气体的减排已刻不容缓，而温室气体减排也顺其自然地成为环境工程领域新技术发展的主流方向与目标。目前主要发展方向有两个：一是环境工程领域各项处理技术在温室气体减排方向的改进和强化；二是环境工程领域以温室气体减排为目标的新技术的研究与开发。

本书就是在上述背景下产生的，旨在帮助广大读者了解当前环境工程领域温室气体控制与节能减排以及新技术的研发现状。同时，本书获得了重庆工学院优秀著作出版基金资助，希望通过本书的出版，对我国广大环保工作者以及环境工程技术人员起到抛砖引玉的作用。

本书编写人员分工如下：第 1 章 (赵天涛、赵由才)；第 2 章 (赵天涛、阎宁、赵由才、汪宝英)；第 3 章 (赵天涛、林治华、韩丹、赵由才)；第 4 章 (赵天涛、全学军、张丽杰、张云茹)；第 5 章 (赵天涛、张丽杰、张云茹、赵由才)；第 6 章 (赵天涛、阎宁、赵由才)。

限于编者水平和时间有限，书中不足和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

于同济大学明净楼

2008 年 12 月

目录

第 1 章 概述	1
1.1 温室气体对全球气候的影响	1
1.1.1 温室气体对气候的影响	1
1.1.2 臭氧层的破坏与恢复	1
1.2 污染治理过程中温室气体的产生	2
1.2.1 废水处理与温室气体的产生	2
1.2.2 固体废物处理与温室气体的产生	4
1.3 废物管理的温室气体减排潜力	6
1.3.1 温室气体减排的国际公约	6
1.3.2 废物处理的温室气体减排潜力分析	8
第 2 章 废水处理过程温室气体的产生及控制	9
2.1 废水处理过程温室气体排放情况	9
2.1.1 废水处理过程二氧化碳和甲烷的排放	9
2.1.2 废水处理过程中氮氧化物的排放	11
2.1.3 稳定塘温室气体的产生	14
2.1.4 人工湿地处理过程温室气体的产生	17
2.1.5 氧化塘系统处理过程温室气体的产生	18
2.2 废水处理技术对温室气体减排的控制	19
2.2.1 废水产沼气	19
2.2.2 废水产酸处理中的二氧化碳减排	23
2.2.3 废水产氢	27
2.2.4 废水脱氮过程中 N_2O 的产生和控制	35
第 3 章 固体废物处理过程温室气体的产生及控制	42
3.1 生活垃圾处理过程的温室气体排放情况	42
3.1.1 生活垃圾填埋	42
3.1.2 垃圾焚烧	47
3.1.3 生活垃圾堆肥	53
3.2 工业固体废物处理过程的温室气体排放情况	54
3.2.1 概述	54
3.2.2 工业固体废物的处理原则	54
3.2.3 工业固体废物处理过程温室气体排放情况	55
3.2.4 电子废弃物处理过程中温室气体的排放与控制	56
3.3 固体废物处理技术对温室气体减排的控制	58
3.3.1 填埋气利用技术	58
3.3.2 上海老港填埋场填埋气的实际利用	61

3.3.3	准好氧填埋	65
3.3.4	餐厨垃圾厌氧发酵	68
3.3.5	固体废物的热解	74
第4章	环境工程领域的甲烷减排技术	89
4.1	甲烷氧化菌的研究与应用	90
4.1.1	甲烷氧化菌的分类和生理特征	90
4.1.2	甲烷氧化菌的生态分布	92
4.1.3	甲烷氧化菌大规模培养技术与填埋场甲烷氧化应用	93
4.2	人为源甲烷生物抑制技术	98
4.2.1	产甲烷菌	98
4.2.2	产甲烷菌抑制机理	100
4.2.3	常见甲烷抑制剂	101
4.2.4	生活垃圾降解过程的甲烷抑制	103
4.2.5	其他环境工程领域甲烷抑制的应用	115
第5章	二氧化碳减排技术	117
5.1	二氧化碳捕获和封存 (CCS) 技术	117
5.1.1	CCS 概况	117
5.1.2	二氧化碳捕获技术	119
5.1.3	二氧化碳地质封存技术	123
5.1.4	海洋封存	126
5.1.5	国际二氧化碳捕获与封存法规体系建设重点与发展方向	129
5.2	二氧化碳的能源转化技术	131
5.2.1	利用太阳能实现二氧化碳的循环使用	131
5.2.2	绿色催化实现二氧化碳的循环使用	132
5.2.3	生物技术实现二氧化碳的循环使用	135
第6章	清洁发展机制下的污染治理分析	138
6.1	清洁发展机制下的垃圾处理	138
6.1.1	垃圾不同处理方式的 CDM 分析	139
6.1.2	垃圾处理碳减排成本计算	141
6.1.3	CDM 机制下垃圾处理的成本收益分析	143
6.1.4	垃圾填埋气发电实例分析	144
6.1.5	城市生活垃圾焚烧发电 CDM 项目案例分析	149
6.2	小型清洁发展机制项目的相关问题	155
6.2.1	小型 CDM 项目的标准与简化模式	155
6.2.2	小型 CDM 项目的交易成本	155
6.2.3	捆绑小型 CDM 项目	157
6.3	环境工程领域的 CDM 方法学	158
6.3.1	CDM 方法学概况	158
6.3.2	已批准通过的方法学	159
6.3.3	已批准方法学的适用范围	160
6.3.4	类型Ⅲ其他项目活动的部分基准线和监测方法学	162
参考文献		177

第 1 章 概述

1.1 温室气体对全球气候的影响

过去几十年间积累的证据表明人类活动会在全球范围内干扰大气,该影响目前主要集中在气候的变化和平流层的臭氧消耗上。而这两个问题最惊人的特征是人类活动已经达到了整个地球都可以被影响的规模,这一严峻的事实使我们对人类活动给环境造成的影响给予更多的关注。

1.1.1 温室气体对气候的影响

地球的气候变化是由很多复杂的因素相互作用控制的,这些因素包括入射的太阳辐射、水的蒸发和冷凝、地球表面向太空的辐射热传递以及地球的自转等。大气很重要的一点是它在保持地球能量的收支平衡上所起的作用。科学家们关注气候变化的主要原因是大气中一些吸收红外辐射的物种丰度在不断增加,而这些气体被称为温室气体。由于来自太阳的入射辐射波长短(可见光波长范围 $0.4\sim 0.5\mu\text{m}$),基本不会受到温室气体的影响;而逸出辐射波长要长得多(红外波长范围约 10nm),它们容易被温室气体所吸收。根据简单的能量平衡可以知道,地球要达到一个新的稳态平衡,大气层系统的温度就必须上升。减少二氧化碳等温室气体排放是防止大气温度升高最直接的方法,而主要手段之一是提高最终使用的能源效率和转向与使用代用能源。目前环境工程领域新技术的研发也着力于此目标的实现,而重点则是新能源和人为源温室气体的减排技术的研究和开发。

1.1.2 臭氧层的破坏与恢复

臭氧层的臭氧含量虽然极其微小,却具有非常强烈的吸收紫外线的功能,可以吸收太阳光紫外线中对生物有害的部分。臭氧层有效地挡住了来自太阳紫外线的侵袭,才使得人类和地球上各种生命能够生存、繁衍和发展。科学家分析,臭氧每减少 10%,得皮肤癌的人数会增加 5%;臭氧每减少 5%,患白内障而失明的人数会增加 50%。

1985 年,英国南极探险家 J. C. Farman 等首先提出南极出现了“臭氧空洞”,后来英国科学家观测到南极上空出现臭氧层空洞,并证实其同氟利昂(CFCs)分解产生的氯原子有直接关系。之后美国宇航局从人造卫星雨云 7 号的监测数据进一步证实了这一点,这一消息震惊了全世界。到 1994 年,南极上空的臭氧层破坏面积已达 2400 万平方公里,北半球上空的臭氧层比以往任何时候都薄,欧洲和北美上空的臭氧层平均减少了 10%~15%,西伯利亚上空甚至减少了 35%。科学家警告说,地球上臭氧层被破坏的程度远比一般人想象的要严重得多。

通常认为,臭氧层的恢复对地球上的生物健康是至关重要的,然而新的研究表明,这种变化同时有助于人们与全球变暖进行的斗争。在2008年6月13日出版的美国《科学》杂志上,气候学家报告说,臭氧层的恢复同时还能够重建南半球的季风系统,从而打破由臭氧损耗和温室气体集结形成的平衡。

1987年,191个国家签署了《蒙特利尔议定书》,该议定书禁止了含氯氟烃化合物的生产,该物质能够破坏臭氧层。从那时开始,脆弱的臭氧层便走上了一条缓慢的修复之路。科学家估计,如果要使臭氧层恢复如初,大约还需要60年。到那时,从极地的春季到秋季,南极洲将不再出现所谓的臭氧层空洞。

然而对于地球气候而言,臭氧层还有另一个并不显著的作用。在过去的50年中,南极的臭氧层空洞增加了南半球的一个名为南环模(SAM)的重要气旋模式的强度。一个密集的臭氧层能够加热下方距离地球表面12~50km的同温层,而臭氧层空洞的出现则会产生冷却作用。在低海拔地区温室气体集结和冷却的同温层的双重作用下,SAM阻挡了更加温暖的空气到达南极洲,从而形成了一个更加寒冷的南极大陆,但这一过程无形中使除此之外的赤道以南的所有地区变暖。

随着臭氧层空洞的愈合以及SAM逐渐恢复到更为正常的状态,研究人员预测,由它们产生的影响将在南半球地区逐渐减少。在最新一项研究中,一个国际研究小组将标准的气候变化计算机模型与考虑了同温层化学变化的其他版本的模型进行了对比。结果表明,臭氧层恢复将重建SAM传统的风模式,同时减轻气候变化对南半球造成的影响。

1.2 污染治理过程中温室气体的产生

污染治理过程,除了要对目标污染物进行有效治理,还要考虑如何减少治理过程中对环境的影响,这点越来越受到重视。这里只做简单的介绍,具体的污染治理技术对温室气体排放的贡献以及技术改进等措施减少温室气体的排放都会在后继章节详细介绍。

1.2.1 废水处理与温室气体的产生

城市废水主要来自生活源和工业源。工业源废水处理过程产生大部分甲烷,特别是来自食品加工、制浆造纸和化学工业的废水,其中的COD浓度通常是生活废水的几倍到几十倍,在处理过程中含碳有机物转化为 CO_2 或 CH_4 ,含氮物质转化为 NH_4^+ 、 NO_x 或 N_2O 。这些气体不可避免地排放到大气中去,使废水处理工程成为一个持续的温室气体发生器。

1.2.1.1 废水处理过程中有机碳的转化

(1) 废水好氧处理过程中有机碳的转化。好氧处理过程中,废水中的有机污染物首先被微生物絮凝体吸附,并与微生物细胞表面接触,在微生物透膜酶的催化作用下,透过细胞壁进入微生物细胞体内,小分子的有机物能够直接透过细胞壁进入微生物体内,而如淀粉、蛋白质等大分子有机物,则必须在细胞外酶——水解酶的作用下,被水解为小分子后再为微生物摄入细胞体内。被摄入细胞体内的有机污染

物，在各种胞内酶，如脱氢酶、氧化酶等的催化作用下，微生物对其进行代谢反应。微生物分解代谢和合成代谢及其产物形成如图 1-1 所示。

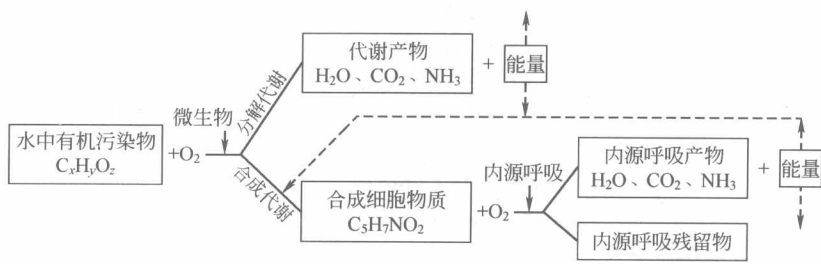


图 1-1 微生物分解代谢和合成代谢及其产物形成示意

无论是分解代谢还是合成代谢，都能够去除废水中的有机污染物，但产物却有所不同，分解代谢的产物是 CO_2 和 H_2O ，可直接排入环境，而合成代谢的产物则是新生的微生物细胞，并以剩余污泥的方式排出活性污泥处理系统，需对其进行妥善处理，否则可能造成二次污染，因为污泥的处理过程同样会排放温室气体。

(2) 废水厌氧处理过程中有机碳的转化。对于一些高水分的有机废物，包括动物和人的排泄物、废水污泥、农作物秸秆、含碳工业废物等，转化成生物能的方式一般为沼气发酵。

发酵技术早已被人们应用，但将其应用于废物的处理还只是近几十年的事情，尤其是近 10~20 年来，随着人们逐渐加深对厌氧菌的认识，生活和工业废水的厌氧污泥法处理已得到广泛的应用，并开发了多种类型的发酵工艺。

图 1-2 为有机物厌氧发酵过程及参与厌氧发酵过程中主要菌群的划分。厌氧发酵就是在特定的厌氧条件下，微生物将垃圾中有机质进行分解，其中一部分碳素物质转化为 CH_4 和 CO_2 。在这个转化作用中，被分解的有机碳化物中的能量大部分转化贮存在 CH_4 中，仅有小部分有机碳化物氧化成 CO_2 ，释放的能量作为微生物生命活动的需要。因此在这一分解过程中，仅积蓄少量的微生物细胞。

厌氧发酵具有以下两个特点。①有机物一旦转化为气态产物后，废液中构成 COD 和 BOD 的化学物质（主要为有机碳）即转变为 CH_4 和 CO_2 。因此，它是一种降低 COD 和 BOD 的主要方法。②由于有机物最终的转化产物中含有大量高热值的 CH_4 气体。因此，它是一种简便的能生产或回收生物能的处理方法。

1.2.1.2 废水处理的脱氮过程

废水生物脱氮包括以下三个基本步骤。

氨化（Ammonification）：废水中的含氮有机物，在生物处理过程中被好氧或厌氧异养型微生物氧化分解为氨氮的过程。

硝化（Nitrification）：废水中的氨氮在好氧自养型微生物（统称为硝化菌）的作用下被转化为 NO_2^- 和 NO_3^- 的过程。

反硝化（Denitrification）：废水中的 NO_2^- 和/或 NO_3^- 在缺氧条件下在反硝化菌（异养型细菌）的作用下被还原为 N_2 的过程。

图 1-3 为生物脱氮过程示意。传统的废水生物脱氮过程是指废水中的有机氮在

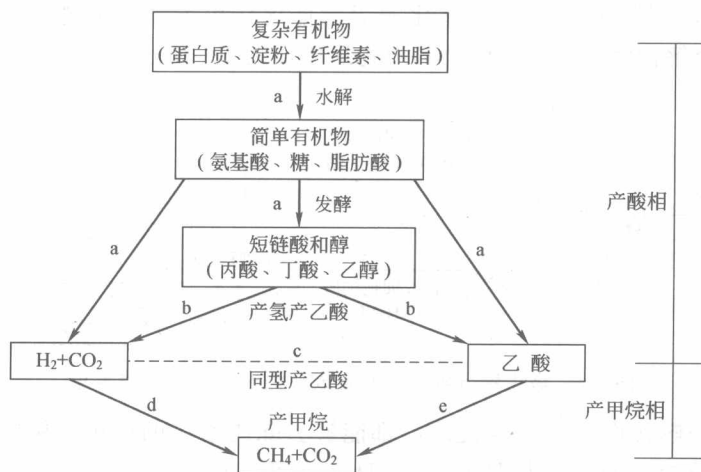


图 1-2 有机物厌氧发酵过程及参与厌氧发酵过程中主要菌群的划分

a—水解发酵细菌；b—产氢产乙酸菌；c—同型产乙酸菌；d—耗氢产甲烷菌；e—耗乙酸产甲烷菌

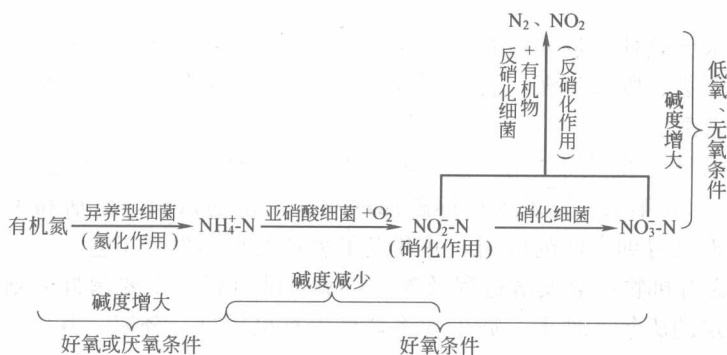


图 1-3 生物脱氮过程示意

微生物的作用下经硝化作用转化为 NO_3^- ，后者经反硝化作用转化为 N_2 。但在对土壤中氮肥转化途径的研究中，土壤系统中氮元素总的输入和输出的不平衡曾使科学家们困惑了 50 多年。研究表明， NO 、 N_2O 作为一些脱氮过程的中间产物进入大气，类似的脱氮过程（或称非传统脱氮过程）在废水处理中也有发生。而实际研究进展表明，硝化-反硝化工艺对处理高浓度含氮废水上并不具备优势。

1.2.2 固体废物处理与温室气体的产生

固体废物是指在生产、生活和其他活动中产生的丧失原有利用价值或者虽未丧失利用价值但被抛弃或者放弃的固态、半固态和置于容器中的气态的物品、物质，以及法律、行政法规规定纳入固体废物管理的物品、物质。固体废物处理的目标是无害化、减量化、资源化。固体废物处理过程中产生温室气体最主要的有 CH_4 和 CO_2 等。它们主要在以下几个处理过程中产生并释放到环境中。

1.2.2.1 垃圾填埋

垃圾填埋场中的有机废物在厌氧状态下分解，会产生填埋气体。除了少量其他

成分之外，填埋气体主要由数量大致相当的 CH_4 和 CO_2 组成。垃圾填埋场产生的沼气主要成分为 CH_4 、 CO_2 ，由于垃圾有机组分复杂，沼气中的其他微量杂质可达 140 余种。沼气是一种具有使气候变暖趋势的强力温室气体。

生活垃圾填埋场的产气过程从填埋后 3 个月开始，持续约 20~25 年。不同阶段的填埋气产量和 CH_4 浓度也不尽相同。填埋气具有利用价值，而填埋初期和后期的 CH_4 是无法利用的。填埋场作为一个重要的人为 CH_4 排放源，与其相关的温室气体减排技术已越来越受到环境工程师的重视。

1.2.2.2 垃圾焚烧

焚烧法是一种高温热处理技术，即以一定量的过剩空气与被处理的有机废物在焚烧炉内进行氧化燃烧反应，废物中的有害有毒物质在 800~1200℃ 的高温下氧化、热解而被破坏，是一种可同时实现废物无害化、减量化和资源化的处理技术。焚烧法不但可以处理固体废物，还可以处理液体废物和气体废物；不但可以处理生活垃圾和一般工业废物，还可以处理危险废物。在焚烧处理生活垃圾时，也常常将垃圾焚烧处理前暂时贮存过程中产生的渗滤液和臭气引入焚烧炉焚烧处理。垃圾焚烧最大的优点是垃圾减量化，但垃圾焚烧会产生大量的 CO_2 ，是一个重要的人为 CO_2 排放源。

1.2.2.3 有机废物堆肥

堆肥是在控制条件下，利用自然界广泛分布的细菌、放线菌、真菌等微生物，促进可被生物降解的有机物发生生物稳定作用，使可被生物降解的有机物转化为稳定的腐殖质的生物化学过程。堆肥过程是在人工控制条件下进行的，不同于卫生填埋、废物的自然腐烂与腐化；作为堆肥化的原料是固体废物中可降解的有机成分；堆肥化的实质是生物化学过程，堆肥产品对环境无害，是一种具有一定肥效的土壤改良剂和调节剂。

有机堆肥的代谢过程见图 1-4，代谢过程中排放的主要温室气体为 CO_2 ，而厌氧堆肥和活性污泥厌氧发酵是相近的，产生的 CH_4 是主要的温室气体。

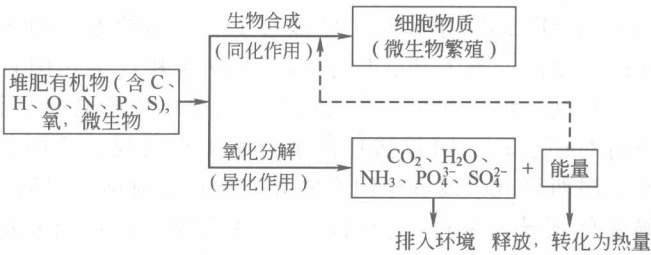


图 1-4 堆肥有机物好氧分解示意

1.2.2.4 固体废物的堆放

堆存固体废物的厌氧降解也是 CH_4 排放的一个主要来源。由此而产生的量取决于固体废物的组成和堆存方式，而且不同的国家之间也有所差别。发达国家固体废物堆存管理较好，且降解程度较高，排放 CH_4 较多。发展中国家，随着其固体废物堆存情况与发达国家差距的日益缩小，将来 CH_4 排放会呈增加趋势。城市固体废物的组成是随着时间和来源的变化而变化的，其主要的生物降解组分是食品废

物、动物废物、花草废物、纸张以及纸板中的纤维素，在堆存时，通过生物和化学的联合作用在隔绝空气的条件下发生降解而产生 CH_4 。

固体废物堆存分为无控制露天堆放和长期密封在固定地点两种方式。在发展中国家比较普遍的是无控制露天堆放，目前世界上有半数以上的人口是以这种方式处理其固体废物。这样的堆存一般较薄，且除靠自重外并未经专门压实，通常会和大量的氧接触而发生有氧降解，几乎不会产生 CH_4 。据估计，目前全球每年因固体废物堆存而排放的 CH_4 为 32Mt，预计到 2025 年将会增 62Mt。

1.2.2.5 工业固体废物的处理

工业固体废物是指工业生产、加工过程中产生的废渣、粉尘、碎屑、污泥等废物。目前，我国工业固体废物的综合利用率仅为 55.8%，而从温室气体减排的角度而言，工业固体废物的处置与利用对原材料使用和能源节省的贡献远远大于基于温室气体排放控制技术的贡献。也就是说，对于工业固体废物的处置与利用并不已温室气体减排为目标。不过值得一提的是，电子废弃物处理处置过程中氟利昂的回收技术已广受重视并被严格执行以尽可能减少其对臭氧层的破坏。

1.3 废物管理的温室气体减排潜力

1.3.1 温室气体减排的国际公约

1.3.1.1 《联合国气候变化框架公约》

《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, 简称《公约》)是 1992 年 5 月 22 日联合国政府谈判委员会就气候变化问题达成的公约，于 1992 年 6 月 4 日在巴西里约热内卢举行的联合国环发大会(地球首脑会议)上通过。《公约》是世界上第一个为全面控制 CO_2 等温室气体排放，以应对全球气候变暖给人类经济和社会带来不利影响的国际公约，也是国际社会在应对全球气候变化问题上进行国际合作的一个基本框架。《公约》于 1994 年 3 月 21 日正式生效。截至 2004 年 5 月，已拥有 189 个缔约方。2008 年 7 月 10 日，美国、英国、法国、德国、意大利、加拿大、俄罗斯和日本八国首脑同阿尔及利亚、埃塞俄比亚、加纳、尼日利亚、塞内加尔、南非、坦桑尼亚七个非洲国家和非洲联盟领导人举行对话会；八国首脑独自举行了工作会议；八国首脑同中国、巴西、印度、南非、墨西哥五个发展中国家领导人举行了对话会议以及主要经济大国能源安全和气候变化领导人举行了会议。在这些会议上，八国表示将寻求与《公约》的其他签约方共同达成到 2050 年把全球温室气体排放减少 50% 的长期目标，八国还同意贯彻温室气体减排的中期目标。

《公约》由序言及 26 条正文组成。这是一个有法律约束力的公约，旨在控制大气中 CO_2 、 CH_4 和其他造成“温室效应”气体的排放，将温室气体的浓度稳定在使气候系统免遭破坏的水平上。《公约》对发达国家和发展中国家规定的义务以及履行义务的程序有所区别。《公约》要求发达国家作为温室气体的排放大户，采取具体措施限制温室气体的排放，并向发展中国家提供资金以支付他们履行公约义务所需的费用。而发展中国家只承担提供温室气体源与温室气体汇的国家清单的义

务，制定并执行含有关于温室气体源与汇方面措施的方案，不承担有法律约束力的限控义务。《公约》建立了一个向发展中国家提供资金和技术，使其能够履行公约义务的资金机制。

1.3.1.2 《京都议定书》

《公约》规定每年举行一次缔约方大会。自 1995 年 3 月 28 日首次缔约方大会在柏林举行以来，缔约方每年都召开会议。第 2 次至第 6 次缔约方大会分别在日内瓦、京都、布宜诺斯艾利斯、波恩和海牙举行。1997 年 12 月 11 日，第 3 次缔约方大会在日本京都召开。149 个国家和地区的代表通过了《京都议定书》，它规定从 2008~2012 年期间，主要工业发达国家的温室气体排放量要在 1990 年的基础上平均减少 5.2%，其中欧盟将 6 种温室气体的排放削减 8%，美国削减 7%，日本削减 6%，同时决定不为发展中国家引入除《公约》以外的新义务。但是 2000 年 11 月在海牙召开的第 6 次缔约方大会期间，世界上最大的温室气体排放国美国坚持要大幅度折扣其减排指标，使会议陷入僵局，大会主办者不得不宣布休会，将会议延期到 2001 年 7 月在波恩继续举行。

1997 年 12 月 1 日至 11 日，第三次缔约方会议（又称“京都会议”）在日本京都举行。这次会议决定制定一项议定书，为发达国家规定 2000 年后减排温室气体的义务及时间表，同时决定不为发展中国家引入除《公约》以外的新义务。该会议终于就制定上述议定书完成了谈判，制定了《（联合国气候变化框架公约）京都议定书》（简称《京都议定书》，Kyoto Protocol）。《京都议定书》为《公约》附件一所列缔约方（主要是发达国家）规定了有法律约束力的量化减排指标，同时并没有为发展中国家规定减排或限排义务。

气候变化是由人为排放温室气体而产生的，那么解决气候变化问题的根本措施就是减少温室气体的人为排放。《京都议定书》的规定只针对如下六种温室气体，具体特征见表 1-1。

表 1-1 六种温室气体的特征

种 类	增温效应/%	生命期/a	排放减少量/%	100 年全球增温潜势
CO ₂	63	50~200	70	1
CH ₄	15	12~17	15~20	23
N ₂ O	4	120	70~80	296
氢氟烃(HFCs)	11 ^①	13.3	70~75	1200
全氟烃(PFCs)		50000	75~80	—
SF ₆ 及其他	7	3200	75~80	22200

① HFCs 与 PFCs 共同的增温效应为 11%。

《京都议定书》第 6、12 和 17 条分别确定了“联合履行”（Joint Implementation，简称 JI）、“清洁发展机制”（Clean Development Mechanism，简称 CDM）和“国际排放权交易”（International Emission Trading，简称 IMT）三种机制（简称三机制）以帮助发达国家实现减排目标，同时也可以帮助发展中国家（东道主）在国际销售碳排放权交易中获得资金和技术，有助于自己的可持续发展。由于发达国家

国内普遍使用较为先进的技术和设备，通过进一步更新技术设备、提高能源效率来实施温室气体减排会产生很高的成本，这使得他们不得不把目光转向《京都议定书》确定的基于项目的国际合作减排机制，即 CDM。

CDM 的内容是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，由此换取投资项目所产生的部分或全部减排额度，作为其履行减排义务的组成部分，这个额度在 CDM 中被定义为“核证减排量 (Certified Emissions Reductions)”，简称 CERs。ET (Emission Trading) 则是指一个发达国家将其超额完成减排义务的指标，以贸易的方式转让给另外一个未能完成减排义务的发达国家，并同时从转让方的允许排放限额上扣减相应的转让额度。

1.3.2 废物处理的温室气体减排潜力分析

据统计，最大的甲烷排放部门是天然气系统，其次是固体垃圾处理，煤矿的排放量在 1990 年排名第三位，预计到 2020 年将保持同一水平。而固体废物甲烷排放量预计会随着人口的增长成比例增长（见表 1-2）。

表 1-2 全球甲烷排放部门的基本量 单位：Mt CO₂

部 门	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年
煤矿	624	478	566	648
石油开采、传输	215	241	284	342
天然气开采、传输	969	981	1270	1540
固体废物处理	822	895	1042	1217
废水处理	490	559	624	688

假定人口的增长和废水处理部门的甲烷排放值的增长是相互联系的，同时利用废水处理设施收集和应用甲烷的成本相对较低。在此前提下的各类排放部门中，废水处理部门能够获得最大的成本效益，其次是固体废物处理部门、天然气系统和煤矿。该分析结果反映了基于常规技术和经济特性的各种减排方法，有些项目由于效率和执行的问题而造成费用的增加和减排效果的下降。当一种具体的减排方法真正开始在某一指定地区实施时，它的执行周期要取决于多个经济和非经济因素。这一点是至关重要的，但并不是本书所讨论的重点内容，本书重点集中在环境工程新技术对现有环保工程的改造以及新技术的研发对温室气体减排的贡献。

2.1 废水处理过程温室气体排放情况

废水处理的目的是去除排放后可能危害水环境的污染物。传统上,废水处理工程师比较重视那些消耗水体溶解氧(DO)的污染物的去除,当今建立的许多废水处理系统仍以去除有机物质为目的。而随着富氧化问题导致水体中植物和藻类的过度生长,使得湖泊和河口加速老化,这些由于氮和磷等营养化导致的水体问题引起重视。在过去的30年,工程师和科学家们开始注重设计有效的、成本低廉的废水处理系统来去除这类污染物。直到最近,人们才开始重视难降解有毒污染物的去除。但总的来说,废水处理工程的研究和设计很少考虑温室气体的排放。值得庆幸的是,很多科学家已经开始注意到废水处理过程的优化是可以控制温室气体减排的,尽管这方面的研究还主要停留在实验室阶段。

2.1.1 废水处理过程二氧化碳和甲烷的排放

2.1.1.1 好氧处理过程

好氧生物反应器一般用于稳定化处理初沉池和废水生物处理中的颗粒态有机物。这些污泥在氧化过程中以溶解氧或硝态氮作为最终电子受体。图2-1为废水好氧处理过程。采用好氧处理系统可以避免强温室气体—— CH_4 的排放,在废水处理过程进入生物处理系统的水中的有机物将处于以下几种状态:(1)氧化为 CO_2 和不同的营养物(即以N、P、S化合物的形式);(2)同化在生物量(污泥)中;(3)保持不变的部分,即不可生物降解的惰性物质(至少在处理系统内不可生物降解);(4)转化为其他有机物质。

我们通常感兴趣的是去除的有机物总量,只有在特定情况下才会关注单种有机物的去除。一般生活废水中的有机物可分为碳水化合物、脂肪和蛋白质。就质量而言,这些物质几乎是等量存在的。表2-1列出了这三类物质的平均分子式、耗氧量、含碳量和含氮量,并给出了废水中的有机物具有大致的化学组成为 $\text{C}_{18}\text{H}_{19}\text{O}_9\text{N}$ 。

表 2-1 生活废水中的有机物

基·质	平均分子式	微生物耗氧量 /(kgO_2/kg)	含碳量 /%	含氮量 /%
碳水化合物	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}_9$	1.13	43	0
油、脂	$\text{C}_8\text{H}_6\text{O}_2$	2.03	72	0
蛋白质	$\text{C}_{14}\text{H}_{12}\text{O}_7\text{N}_2$	1.20	53	8.8
平均	$\text{C}_{18}\text{H}_{19}\text{O}_9\text{N}$	1.42	55	3.6