

节 能 与 环 境 保 护 丛 书

洁净燃烧技术

刘圣华 姚明宇 张宝剑 编著



化学工业出版社
环境·能源出版中心

节能与环境保护丛书

洁净燃烧技术

刘圣华 姚明宇 张宝剑 编著



化学工业出版社
环境·能源出版中心

· 北京 ·

本书为《节能与环境保护丛书》之一,详细介绍了洁净燃烧技术的基本理论及其应用,包括空气污染、燃烧的基本理论、汽车发动机原理、汽车发动机的洁净燃烧技术、GDI和HCCI发动机燃烧技术、煤的燃烧前净化技术、煤粉清洁燃烧技术、煤的循环流化床燃烧以及煤的气化和液化技术。

本书可供能源动力工程、化学工程、环境工程、煤化工等领域工程技术人员、科研人员使用,也可供相关专业院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

洁净燃烧技术/刘圣华,姚明宇,张宝剑编著. —北京:化学工业出版社,2006.8

(节能与环境保护丛书)

ISBN 7-5025-9189-3

I. 洁… II. ①刘…②姚…③张… III. 燃烧-净化 IV. TQ038.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第089807号

节能与环境保护丛书

洁净燃烧技术

刘圣华 姚明宇 张宝剑 编著

责任编辑:戴燕红

文字编辑:丁建华

责任校对:凌亚男

封面设计:关 飞

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

购书咨询:(010) 64982530

(010) 64918013

购书传真:(010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市万龙印装有限公司装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 22 字数 556千字

2006年10月第1版 2006年10月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-9189-3

定 价:49.00元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

节能与环境保护丛书

主 编 林宗虎 院士

副主编 俞炳丰 教授

张 旭 教授

车得福 教授

序

为了全面建设小康社会、不断开创中国特色社会主义事业的新局面，必须大力推进科技进步和创新，进一步发挥科学技术对经济社会全面发展的关键性作用。要大力发展高新技术和先进适用技术。要大力加强能源领域的科技进步和创新，提高我国资源特别是能源和水资源的使用率，减少资源浪费。要大力加强生态、环境领域的科技进步和创新，降低污染物的排放，加强对废弃物的再次利用，发展循环经济。这些都是中央当前对我国广大科技人员提出的殷切希望和要求。

我国虽然资源不少，但人口众多，人均能源资源十分有限。人均化石燃料仅为世界均值的 56%，石油天然气人均可采储量仅为世界均值的 8%。水力资源可开发量虽达 3.79 亿千瓦，但人均不到 0.3 千瓦。且一次能源消耗中主要为煤炭，约占总能源消耗的 70%，即使到 2050 年，煤炭耗量预计也将占一次能源总耗量的 50%，因此环境污染严重。我国三分之一以上国土受到酸雨危害，如不采取措施，二氧化碳排放量预计将从 2000 年占全球总量的 12.7% 增加到 2020 年的 16.7%。此外，空气中的粉尘、二氧化硫和氮氧化物的污染也很严重。因此，加强节能、提高能源利用率和改善能量利用中的环境保护已成为我国经济持续发展中的一个重要课题。

随着我国国民经济发展和人民生活水平的提高，家用电器的大量使用和建筑业的迅速发展不仅使能耗进一步增大，并且引起新的环境保护问题。

为了促进和推动节能工作，改善能量利用中的环境保护，特编辑出版了这一套丛书。这套丛书共 9 本，书名分别为：《强化传热技术》，《烟气热能的梯级利用》，《蒸汽凝结水的回收及利用》，《建筑环境与建筑节能》，《热泵技术》，《城市垃圾的处理与利用技术》，《冷热电联产技术》，《热管技术》和《洁净燃烧技术》。每本著作均由知名专家根据国内外近期科研成果和工程实践执笔编著，可供大专院校师生、科研院所和工矿企业相关科技人员应用和参考。希望这套丛书能对我国的节能和环保事业的发展有所裨益。

中国工程院院士

林宗虎

前 言

燃料燃烧是我们获取能源的最主要最直接的方式。自从人类发明使用火，燃烧就与我们结下了不解之缘。从远古人类的刀耕火种，到现代的汽车轮船水陆交通、火力发电以及航空航天等，燃烧技术的发展促进了人类文明的进步。

现在，大量燃烧煤、石油和天然气等一次性化石能源，使我们在获得生产和生活所需能源的同时，由于燃烧技术的落后，也造成了较为严重的大气污染。目前我国每年大约消耗煤炭 15 亿吨，石油 2.8 亿吨，天然气 500 亿立方米。从能源供应体系上看是以煤为主，煤炭在整个能源消费体系中的比例约占 70%。大量的化石燃料燃烧造成了大气污染，据 2002 年统计显示，我国 471 个城市中，仅有 209 个城市环境空气质量达到国家二级标准；全国 47 个环境保护重点城市中，只有 17 个城市空气质量达到国家二级标准；113 个大气污染防治重点城市中，仅有 30 个城市的空气质量能够达到国家二级标准。虽然总体上城市空气质量恶化的趋势得到遏制，但空气污染程度仍然严重，劣三级空气质量的城市占相当大的比重，其中尤以颗粒物超标最突出，一半以上的城市颗粒物浓度未达到国家二级标准。空气污染物绝大多数源自燃煤和机动车辆尾气，而且随着国民经济的快速发展还有不断增加的趋势。特别是近几年来我国汽车工业的高速发展，在北京、上海等大中城市机动车保有量剧增，机动车排气污染的分担率逐步提高，有的已超过燃煤成为第一污染源，空气污染由过去燃煤污染型转变为汽车尾气污染型，因此，治理机动车尾气和锅炉烟气排放就成为摆在广大燃烧科技工作者面前的紧迫任务。

化石燃料燃烧的排气污染物主要是未燃碳氢（HC）、一氧化碳（CO）、氮氧化物（NO、NO₂、N₂O 等）、硫化物（SO₂、SO₃）和颗粒物（PM）等，它们之间还可能形成光化学烟雾等二次污染。汽车排气污染需要从燃料、发动机燃烧和汽车尾气后处理三个方面入手治理。清洁燃料是实现发动机洁净燃烧的基础，采用现代电子控制技术、优化发动机的缸内燃烧过程是实现高效低污染燃烧的关键，而发动机的排气后处理则是重要的补充和最后的保障。煤的洁净燃烧技术包括以下三个方面：煤燃烧前的净化技术；煤燃烧过程中的污染物生成控制技术以及煤的洁净转化技术。

本书旨在介绍一些关于洁净燃烧的技术和基本理论，以及作者及其所在单位承担国家能源领域重大基础研究（973）项目，在洁净燃烧技术方面所取得的一些研究成果。其中第 1 章介绍了有关空气污染方面的一些知识；第 2 章主要介绍与内燃机燃烧有关的基础理论知识；第 3 章介绍了汽车发动机（内燃机）原理及其燃烧与排放的主要影响因素；第 4 章分别重点介绍了汽油机和柴油机实现洁净燃烧方面的技术方法等；第 5 章是关于现在内燃机燃烧与排放研究的热点 GDI 和 HCCI 燃烧理论和技术；第 6 章介绍煤的燃烧前净化技术，包括煤的洗选、动力配煤与型煤技术、动力煤的炉前脱硫以及水煤浆技术；第 7 章和第 8 章介绍煤燃烧过程中的污染物生成控制技术，包括煤粉清洁燃烧技术和循环流化床燃烧技术；第 9 章和第 10 章分别介绍煤的气化和液化技术。

本书的编写其实是作者的一次系统的学习过程，由于理论与实践水平所限，加之时间仓促，不足之处在所难免，敬请读者指正。

编者
2006 年 4 月于西安

目 录

1 空气污染	1
1.1 空气污染概述	1
1.1.1 大气成分及其变迁	1
1.1.2 空气污染及污染物	2
1.1.3 空气污染指数	3
1.2 空气污染对人类及环境的危害	4
1.2.1 悬浮颗粒物污染与人体健康	4
1.2.2 氮氧化物污染与人体健康	5
1.2.3 二氧化硫污染与人体健康	5
1.2.4 一氧化碳污染与人体健康	5
1.2.5 光化学烟雾污染与人体健康	6
1.2.6 空气污染对环境的危害	6
1.2.7 温室气体排放对环境的影响	7
1.3 空气污染源	8
1.4 大气污染物的检测方法	9
参考文献	10
2 燃烧的基本理论	11
2.1 燃料及其特性	11
2.1.1 气体燃料	12
2.1.2 液体燃料	13
2.1.3 固体燃料	15
2.2 燃料的燃烧化学	17
2.2.1 化学计量空燃比	17
2.2.2 燃料的热值	19
2.2.3 绝热燃烧温度	20
2.3 可燃预混合气的燃烧	21
2.3.1 火花点火系统	21
2.3.2 火花放电	22
2.3.3 最小点火能量	23
2.3.4 预混燃烧	23
2.3.5 火焰传播界限	27
2.4 液体燃料喷雾与燃烧	28
2.4.1 液体燃料雾化装置简介	29
2.4.2 液体燃料喷射雾化机理	29
2.4.3 液体燃料喷雾油束特性参数	30
2.4.4 液体燃料的喷雾燃烧	35
2.5 煤粉的燃烧	38
2.5.1 煤粉燃烧概述	38
2.5.2 煤粉的着火	39
2.5.3 煤粉颗粒的燃烧	41
2.5.4 煤粉燃烧模型简介	44
参考文献	44
3 汽车发动机原理	45
3.1 内燃机的理论循环	45
3.2 四冲程内燃机的工作原理	47
3.2.1 内燃机的工作行程	47
3.2.2 内燃机的换气损失和泵气损失	50
3.2.3 汽油机和柴油机工作循环的 比较	52
3.3 内燃机中的进气流动	52
3.3.1 进气涡流	53
3.3.2 挤流	55
3.3.3 滚流	55
3.4 汽油机的燃烧及排放	56
3.4.1 汽油机的燃烧过程	56
3.4.2 循环变动与爆震燃烧	58
3.4.3 汽油机的排放特性	59
3.4.4 汽油机燃烧与排放的影响 因素	63
3.5 柴油机的燃烧与排放	66
3.5.1 柴油机的燃烧过程	66
3.5.2 柴油机的有害排放	68
3.5.3 柴油机燃烧与排放的影响 因素	70
参考文献	73
4 汽车发动机的洁净燃烧技术	74
4.1 洁净燃料	74
4.1.1 洁净的汽油和柴油	74
4.1.2 醇类燃料	77
4.1.3 二甲醚燃料	83
4.2 汽油机的洁净燃烧技术	86
4.2.1 汽油机电控技术的发展	87
4.2.2 发动机点火正时和喷油量 控制	94
4.2.3 高效燃烧的组织	97
4.2.4 排气催化后处理技术	102
4.2.5 冷启动和暖机过程的排放 控制	103

4.3 柴油机的洁净燃烧	107	7.1.1 煤粉燃烧 NO_x 产生机理	175
4.3.1 柴油电控高压喷射系统	108	7.1.2 煤粉燃烧 NO_x 的还原机理	188
4.3.2 柴油机的优化燃烧	113	7.1.3 煤粉燃烧 NO_x 排放的影响 因素	190
4.3.3 排气涡轮可变增压	116	7.1.4 低 NO_x 燃烧技术	192
4.3.4 柴油机排气后处理技术	119	7.1.5 低 NO_x 燃烧器	198
参考文献	126	7.2 燃烧脱硫技术	204
5 GDI 和 HCCI 发动机燃烧技术	127	7.2.1 煤中硫的赋存形态	205
5.1 汽油缸内直喷分层燃烧发动机	127	7.2.2 煤燃烧硫氧化物产生机理	205
5.1.1 进气道喷射稀燃汽油机	128	7.2.3 燃烧过程中石灰石固硫反应 机理	207
5.1.2 缸内直喷汽油机	129	7.2.4 炉内喷钙脱硫	208
5.2 HCCI 燃烧式发动机	136	7.3 煤的催化燃烧技术	216
5.2.1 HCCI 方式的燃烧特点	136	7.3.1 煤的催化燃烧原理	217
5.2.2 二甲醚 HCCI 发动机	139	7.3.2 煤的催化燃烧过程	217
5.2.3 DME HCCI 发动机的排放 特性	143	7.3.3 催化燃烧控制污染物生成 原理	219
5.2.4 HCCI 发动机工况范围的拓展	145	参考文献	220
参考文献	147	8 煤的循环流化床燃烧	222
6 煤的燃烧前净化技术	148	8.1 循环流化床燃烧原理	222
6.1 选煤技术	148	8.1.1 气固流态化理论	222
6.1.1 选煤技术概述	148	8.1.2 循环流化床中煤的燃烧	227
6.1.2 跳汰选煤技术	149	8.1.3 循环流化床中的传热	233
6.1.3 重介质选煤技术	151	8.2 循环流化床锅炉	238
6.1.4 浮游选煤技术	152	8.2.1 循环流化床锅炉系统	238
6.1.5 流化床干法选煤技术	154	8.2.2 循环流化床锅炉分类及主要 流派	260
6.2 动力配煤与型煤技术	155	8.2.3 大型循环流化床锅炉实践	262
6.2.1 动力配煤概述	155	8.3 循环流化床燃烧与污染控制	267
6.2.2 典型配煤工艺及技术标准	156	8.3.1 循环流化床燃烧控制 SO_x 原理与 应用	267
6.2.3 型煤概述	157	8.3.2 循环流化床燃烧氮氧化物的产生 与控制	275
6.2.4 典型型煤生产工艺与设备	158	8.4 循环流化床锅炉燃烧产物的综合 利用	278
6.3 动力煤的炉前脱硫技术	159	8.4.1 循环流化床锅炉灰渣的特性	279
6.3.1 煤的炉前脱硫概述	159	8.4.2 循环流化床锅炉灰渣的综合利用 措施	281
6.3.2 煤的磁法脱硫技术	160	8.5 超临界循环流化床锅炉	284
6.3.3 煤的化学脱硫技术	160	8.5.1 超临界循环流化床锅炉的 特点	285
6.3.4 煤的微生物脱硫法	162	8.5.2 我国超临界循环流化床锅炉概念 设计	287
6.3.5 煤的炉前脱硫方法研究进展	164	8.5.3 国外超临界循环流化床锅炉发展 现状	289
6.4 水煤浆技术	164		
6.4.1 研究水煤浆技术的意义	164		
6.4.2 水煤浆的燃料特性	165		
6.4.3 水煤浆的制备	167		
6.4.4 水煤浆的燃烧	168		
6.4.5 水煤浆在我国的工业应用	172		
6.4.6 超细水煤浆	173		
参考文献	173		
7 煤粉清洁燃烧技术	175		
7.1 煤粉低 NO_x 燃烧技术	175		

参考文献	290	9.5.3 煤气的脱硫与脱氰	320
9 煤气化技术	292	参考文献	322
9.1 煤气化基本原理	292	10 煤液化技术	324
9.1.1 煤气化概述	292	10.1 煤直接液化概述	324
9.1.2 煤气化的化学动力学基础	295	10.1.1 煤直接液化现状	324
9.1.3 煤的催化气化	296	10.1.2 煤直接液化的基本原理	325
9.1.4 影响煤气化效果的主要因素	297	10.1.3 影响煤直接液化产率的关键 因素	327
9.1.5 煤气的种类	298	10.2 常见煤直接液化工艺	329
9.2 移动床气化技术	299	10.2.1 SRC 煤液化工艺	329
9.2.1 发生炉煤气	299	10.2.2 EDS 煤液化工艺	330
9.2.2 水煤气	300	10.2.3 H-Coal 煤液化工艺	332
9.2.3 两段炉的基本原理	302	10.2.4 德国 IGOR 煤液化工艺	332
9.2.4 典型常压移动床气化炉	302	10.2.5 CTSL 煤液化工艺	333
9.2.5 加压移动床气化技术	305	10.2.6 煤直接液化油产品的特点	334
9.3 流化床气化技术	308	10.3 煤间接液化技术	335
9.3.1 流化床气化概述	308	10.3.1 F-T 合成的基本原理	335
9.3.2 典型流化床气化炉	310	10.3.2 液体燃料合成反应器	336
9.4 气流床气化技术	313	10.3.3 合成液体燃料结果的影响 因素	337
9.4.1 气流床气化概述	313	10.3.4 典型间接液化工艺	337
9.4.2 典型气流床气化炉	315	10.3.5 煤间接液化油产品的特点	339
9.5 煤气的冷却与净化	318	参考文献	339
9.5.1 煤气净化的必要性	318		
9.5.2 煤气的除尘与冷却	318		

1 空气 污 染

人类生活的地球被一层很厚的大气层包围着，大气层由低到高依次可分为对流层（厚度大约为 10~20km）、平流层（距地球表面 20~50km）、中间层（距地球表面 50~85km）、暖层（距地球表面 100~800km）和散逸层（暖层之上）及外层空间。在距地面 20~30km，介于对流层和平流层之间，还有一个成分特殊的臭氧层。臭氧层大量吸收紫外线，起到了阻挡紫外线，保护地球生命免受紫外线伤害的作用。

一直以来，人们生活和生产的能源主要通过燃烧一次性能源获得，特别是通过燃烧煤炭、石油和天然气等化石能源。由于需求量的巨大和燃烧技术的落后，再加上没有对空气污染的清醒认识，燃烧所产生的氮氧化物、硫化物、粉尘颗粒等污染了大气，给人类自身造成了巨大的危害。20 世纪 60 年代以前，震惊世界的 8 大公害事件，其中烟雾造成的空气污染占了 5 起，众所周知的当数英国伦敦烟雾和美国洛杉矶的光化学烟雾事件。

二氧化碳的大量排放还加剧了大气的温室效应，使全球气候变暖；氯氟烃的排放对臭氧层造成了很大的破坏。酸雨、地表水酸化等也是空气污染的结果。保护人类赖以生存的地球，控制人类活动对大气的污染是一个迫切的现实问题。

1.1 空气 污 染 概 述

何谓空气污染？当空气中一种新成分的加入或某一成分的比例发生了较大改变，已经或有可能造成一些有害的后果或令人感到不舒服，则空气污染就发生了。按成因，空气污染也可以分成两种类型：自然污染和人为污染。由于火山爆发、森林大火、煤矿的自然燃等自然因素造成的污染称为自然污染；而由于我们人类的生活、工业生产等活动所形成的污染就是人为污染。

1.1.1 大气成分及其变迁

空气主要是有氮气（N₂）、氧气（O₂）及一些微量气体组成，表 1-1 列出了海平面干空气的成分及所占比例。

表 1-1 海平面干空气的成分及所占比例

成 分	含量(体积分数)/%	成 分	含量(体积分数)/%
氮气	78.084	氧气	20.984
氩气	0.934	二氧化碳	0.033
氟气	18×10^{-4}	氦气	5.30×10^{-4}
甲烷	18×10^{-4}	氖气	5.30×10^{-4}
氢气	0.50×10^{-4}	N ₂ O	0.30×10^{-4}
氙气	0.09×10^{-4}	O ₃	$(0.02 \sim 0.1) \times 10^{-4}$

氮气在空气中所占的比例最大。氮气本身无毒，但浓度过高将导致呼吸困难。氮通过土壤中的固氮菌来参与动植物的生命过程。氧气对人类等需氧生物和微生物的生命活动最重要，氧气参与代谢过程，使生命获得所需的能量。空气中的二氧化碳浓度虽低，但它参与光合作用，对生命活动和维持地球上的生物与环境之间气体的交换和循环具有不可或缺的意义。

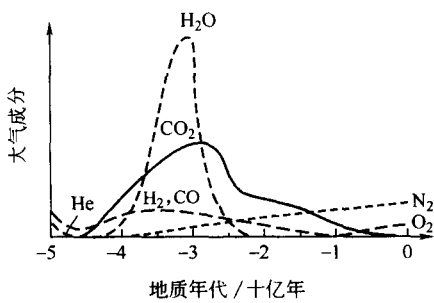


图 1-1 不同地质年代地球大气成分的变迁

义。人类和一切动物以及好氧性的微生物，都要靠氧气生活，排出的二氧化碳被绿色植物转化，但高浓度的氧及二氧化碳同样是有害的。

大气成分在地质年代看是变化的，图 1-1 所示为地球不同地质年代大气成分的相对变化情况。大约在 30 亿年前后，地球大气变冷，水蒸气冷凝成液态的水，二氧化碳溶于水中，其大气浓度开始下降，在 5 亿年前的时候下降到 0.3%，在工业化前接近 0.03%。

相对人类社会历史，空气中的成分又是相对稳定的，这是维持地球上生命延续的关键。但工业化

革命以来，人类对环境的改变在明显地加剧。表 1-2 所列常见微量气体成分在工业化前后的变化情况，如温室气体 CO_2 的体积浓度就由大约百万分之 270 上升到百万分之 340，使大气的温室效应显现。

表 1-2 常见微量气体成分在工业化前后的变化

成 分	含量/(mL/m^3)		成 分	含量/(mL/m^3)	
	前	今		前	今
CO_2	270	340	SO_2	0.001	0.002
CH_4	1.0	1.7	NH_3	0.004	0.006
N_2O	0.28	0.30	C_2H_4	0.0	0.0002
CO	0.05~0.2	0.13	CFCs	0.0	0.00015

人类活动产生的微量气体对大气的影晌不只有 CO_2 ，如氟氯烃 (CFCs) 等，对大气中臭氧的含量有很大的影响，它使臭氧层变薄，局部甚至出现空洞，破坏了原来臭氧层与紫外线辐射的平衡，从而改变了紫外线辐射地球表面的强度，可能危及地球生命。

1.1.2 空气污染及污染物

包围地球的大气是一个有机的整体，各种成分处于一种相对稳定的状态，各自发挥着重要的作用，二氧化碳起到给地球保温的作用，臭氧反射宇宙紫外线的辐射等。空气污染的发生是指一种新成分的加入或原空气成分比例的较大改变，有可能造成一些有害的后果或令人不舒服等。当然，对危害的认识是局限在现有科学知识和技术条件下的，随着科学技术的进步，认识会逐步提高。诸如空气的能见度、一些气味等，并不一定对人体有害，但使人感觉到不舒服，也可以认为空气被污染了。

英国伦敦烟雾事件 (London Smog) 和美国洛杉矶汽车烟雾事件 (California Smog) 是两起非常典型的空气污染事件。

伦敦地处泰晤士河下游的开阔河谷地段，1952 年 12 月 5~8 日，冬季，伦敦地面无风，空气潮湿而沉重，伦敦一连几日沉浸在浓雾之中，而伦敦成千上万的烟囱照样向空气中喷吐大量的黑烟，结果使空气中的颗粒和二氧化硫的浓度急剧增加，形成致命的酸性烟雾，前后导致万人以上死亡。直到 1962 年，人们才弄明白造成英国伦敦烟雾事件的真正原因，此次事件使人们认识到了燃煤烟气的危害。

美国的洛杉矶依山傍海，地处一个直径约 50km 的盆地。空气在水平方向流动缓慢，逆温天气多，城市内的空气污染不易扩散。洛杉矶经济发达，20 世纪 40 年代汽车保有量就已

超过 250 万辆，每天有 1000 多吨碳氢化合物、500 多吨氮的氧化物和 4000 多吨一氧化碳排入大气，这些碳氢化合物和氮氧化物在晴天阳光紫外线的作用下，形成一种浅蓝色的光化学烟雾，数日不散，刺激人的眼、鼻，使喉咙发炎。这种以臭氧为主的光化学烟雾严重时导致呼吸困难、视力减退，会引起人的生理机能的衰退，浓度高时还会致人死亡。

造成英国伦敦烟雾事件的元凶是悬浮颗粒物和二氧化硫，洛杉矶汽车烟雾事件的元凶是汽车尾气排放中的氮氧化物与未燃碳氢化合物和一氧化碳，因此与燃烧过程有关，造成空气污染的污染物主要有氮氧化物（NO_x）、一氧化碳（CO）、未燃的碳氢化合物（HC）、硫氧化物（SO_x）和颗粒物（PM）。它们之间还可以发生相互作用，进一步形成诸如光化学烟雾、酸雨等污染。

我国政府非常重视环境保护问题，特别关注城市空气质量的提高，对 47 个重点城市空气质量进行每日报告，表 1-3 列出了 2005 年某日我国部分重点城市空气质量日报结果，日报中所依据的污染物主要有三项：二氧化硫（SO₂）、二氧化氮（NO₂）、可吸入颗粒物。由表中数据可见，全国城市空气首要污染物是可吸入颗粒，部分城市为二氧化硫，空气质量总体上优良。

表 1-3 部分重点城市空气质量日报

城市名称	污染指数	首要污染物	空气质量级别	空气质量状况
北京	99	可吸入颗粒物	Ⅱ	良
天津	68	可吸入颗粒物	Ⅱ	良
沈阳	86	可吸入颗粒物	Ⅱ	良
上海	82	可吸入颗粒物	Ⅱ	良
南京	112	可吸入颗粒物	Ⅲ 1	轻微污染
杭州	104	可吸入颗粒物	Ⅲ 1	轻微污染
广州	76	二氧化硫	Ⅱ	良
深圳	39	—	I	优
桂林	50	—	I	优
大连	43	—	I	优
重庆	51	可吸入颗粒物	Ⅱ	良
成都	54	可吸入颗粒物	Ⅱ	良
贵阳	62	二氧化硫	Ⅱ	良
昆明	53	可吸入颗粒物	Ⅱ	良
西安	68	可吸入颗粒物	Ⅱ	良

1.1.3 空气污染指数

空气质量预报中的空气污染指数（air pollution index，API）是一项可以定量、客观地评价空气环境质量的指标，是对空气中的若干种主要污染物的监测数据，参照一定的分级标准，经过综合换算而得到的。空气污染指数的分级标准是：①API 50 点对应的污染物浓度为国家空气质量日均值一级标准；②API 100 点对应的污染物浓度为国家空气质量日均值二级标准；③API 200 点对应的污染物浓度为国家空气质量日均值三级标准；④API 更高值段的分级对应于各种污染物对人体健康产生不同影响时的浓度限值。我国目前计入空气污染指数的项目暂定为二氧化硫、氮氧化物和总悬浮颗粒物，各项污染物的浓度限值见表 1-4。

表 1-4 各项污染物的浓度限值

污染物名称	取值时间	浓 度 限 值			浓 度 单 位
		一级标准	二级标准	三级标准	
二氧化硫(SO ₂)	年平均	0.02	0.06	0.10	mg/m ³ (标准状态)
	日平均	0.05	0.15	0.25	
	1h平均	0.15	0.50	0.70	
总悬浮颗粒物(TSP)	年平均	0.08	0.20	0.30	
	日平均	0.12	0.30	0.50	
可吸入颗粒物(PM10)	年平均	0.04	0.10	0.15	
	日平均	0.05	0.15	0.25	
氮氧化物(NO)	年平均	0.05	0.05	0.10	
	日平均	0.10	0.10	0.15	
	1h平均	0.15	0.15	0.30	
二氧化氮(NO ₂)	年平均	0.04	0.04	0.08	
	日平均	0.08	0.08	0.12	
	1h平均	0.12	0.12	0.24	
一氧化碳(CO)	日平均	4.00	4.00	6.00	
	1h平均	10.00	10.00	20.00	
臭氧(O ₃)	1h平均	0.12	0.16	0.20	
铅(Pb)	季平均	1.50			μg/m ³ (标准状态)
	年平均	1.00			
苯并[a]芘(B[a]P)	日平均	0.01			
氟化物(F)	日平均	7 ^①			
	1h平均	20			
	月平均	1.8 ^②		3.0 ^③	
	植物生长季平均	1.2 ^②		2.0 ^③	μg/(dm ² ·d)

- ① 适用于城市地区。
② 适用于牧业区和以牧业为主的半农半牧区、蚕桑区。
③ 适用于农业和林业区。

1.2 空气污染对人类及环境的危害

空气中主要的污染物概括起来可分为颗粒污染物和有害气体，空气污染对人类健康及环境都已经造成了不可估量的危害。

1.2.1 悬浮颗粒物污染与人体健康

通常把悬浮在空气中的粒径小于 100μm 的颗粒物通称总悬浮颗粒物 (total suspending particulate, TSP)，其中粒径小于 10μm 的称可吸入颗粒物 (PM₁₀)。可吸入颗粒物因粒小体轻，能在大气中长期飘浮，不断蓄积，使污染程度逐渐加重。可吸入颗粒物成分很复杂，并具有较强的吸附能力，例如可吸附各种金属粉尘和强致癌物苯并 [a] 芘、吸附病原微生物等。可吸入颗粒物随人们呼吸空气而进入呼吸系统，以碰撞、扩散、沉积等方式滞留在呼吸道不同的部位：粒径小于 5μm 的颗粒物 (PM₅) 多滞留在上呼吸道，粒径小于 2.5μm 的颗粒物 (PM_{2.5}) 可以穿透肺泡，直接进入组织。滞留在鼻咽部和气管的颗粒物，与进入人体的二氧化硫 (SO₂) 等有害气体产生刺激和腐蚀黏膜的联合作用，损伤黏膜、纤毛，引起炎症和增加气道阻力。持续不断的作用会导致慢性鼻咽炎、慢性气管炎。滞留在细支气管

与肺泡的颗粒物也会与二氧化氮等产生联合作用，损伤肺泡和黏膜，引起支气管和肺部产生炎症。长期持续作用，还会诱发慢性阻塞性肺部疾患并出现继发感染，最终导致肺心病，死亡率增高。

当大气处于逆温状态时（气温随高度的增加而升高，这种情况称为逆温），空气上下对流不好，近地面的空气污染物不易扩散，悬浮颗粒物浓度会迅速上升，空气污染加重。1952年12月英国伦敦发生烟雾事件时，大气中悬浮颗粒物的含量比平时高5倍，引起居民死亡率激增，4天内较同期死亡人数增加4000余人。由此可见大气中可吸入颗粒物浓度突然增高，对人类健康能造成急性危害，对患有心肺疾病的老人和儿童威胁更大。

悬浮颗粒物还能直接接触皮肤和眼睛，阻塞皮肤的毛囊和汗腺，引起皮肤炎和眼结膜炎或造成角膜损伤。此外，悬浮颗粒物还能降低大气透明度，减少地面紫外线的照射强度；紫外线照射不足，会间接影响儿童骨骼的发育。

1.2.2 氮氧化物污染与人体健康

空气中含氮的氧化物有一氧化二氮（ N_2O ）、一氧化氮（ NO ）、二氧化氮（ NO_2 ）、三氧化二氮（ N_2O_3 ）等，其中主要的是一氧化氮和二氧化氮，常统称为氮氧化物（ NO_x ），是常见的气体污染物质，其中以二氧化氮的毒性最大，它的毒性比一氧化氮高4~5倍。

由于氮氧化物较难溶于水，因而能侵入呼吸道深部细支气管及肺泡，并缓慢地溶于肺泡表面的水分中，形成亚硝酸、硝酸，对肺组织产生强烈的刺激及腐蚀作用，引起肺水肿。亚硝酸盐进入血液后，与血红蛋白结合生成高铁血红蛋白，引起组织缺氧。当污染物以二氧化氮为主时，对肺的损害比较明显，二氧化氮与支气管哮喘的发病也有一定的关系；当污染物以一氧化氮为主时，高铁血红蛋白症和中枢神经系统损害比较明显。

NO_x 还是形成光化学烟雾的元凶之一，一氧化二氮也是重要的温室气体之一。

1.2.3 二氧化硫污染与人体健康

二氧化硫是一种无色有刺激性的气体，是一种常见的和重要的大气污染物。二氧化硫对人体的危害主要表现在以下3个方面。

① 刺激呼吸道。二氧化硫易溶于水，当其通过鼻腔、气管、支气管时，多被管腔内膜水分吸收，变成亚硫酸、硫酸和硫酸盐，使刺激作用增强。

② 二氧化硫和悬浮颗粒物的联合毒性作用。二氧化硫和悬浮颗粒物一起进入人体，气溶胶微粒能把二氧化硫带到肺深部，使毒性增加3~4倍。此外，当悬浮颗粒物中含有三氧化二铁等金属成分时，可以催化二氧化硫氧化成酸雾，吸附在微粒的表面，被代入呼吸道深部。硫酸雾的刺激作用比二氧化硫约强10倍。

③ 二氧化硫的促癌作用。动物实验证明 $10mg/m^3$ 的二氧化硫可加强致癌物苯并[a]芘的致癌作用。在二氧化硫和苯并[a]芘的联合作用下，动物肺癌的发病率高于单个致癌因子的发病率。

此外，二氧化硫进入人体时，血液中的维生素便会与之结合，使体内维生素C的平衡失调，从而影响新陈代谢。二氧化硫还能抑制和破坏或激活某些酶的活性，使糖和蛋白质的代谢发生紊乱，从而影响机体生长发育。

此外，二氧化硫还是酸雨的主要成因，酸雨及地表水的酸化对人类健康和生活也产生重要的影响。

1.2.4 一氧化碳污染与人体健康

一氧化碳是一种无色、无味、无臭、无刺激性的有毒气体，几乎不溶于水，在空气中不

容易与其他物质产生化学反应，故可在大气中停留很长时间。一氧化碳属于内窒息性毒物。空气中一氧化碳浓度到达一定高度，就会引起多种中毒症状，甚至死亡。

一氧化碳与血红蛋白的亲合力比氧的亲合力大 200~300 倍，因此，当一氧化碳侵入机体后，很快就与血红蛋白结合成碳氧血红蛋白 (COHb)，阻碍氧与血红蛋白结合成氧合血红蛋白 (HbO₂)，造成器官组织缺氧，形成一氧化碳中毒。当一氧化碳的浓度达到 0.5%，人在此环境只要 20~30min，就会出现脉弱、呼吸变慢、最后衰竭致死等中毒症状。长时间接触低浓度的一氧化碳对人体心血管系统、神经系统乃至对后代均有一定影响。

1.2.5 光化学烟雾污染与人体健康

光化学烟雾是由大气中的氮氧化物和碳氢化物受太阳紫外线作用产生的一种具有刺激性的浅蓝色的烟雾，它包含有臭氧 (O₃)、醛类等多种光化学反应生成的二次污染物，其中臭氧约占 85%。在汽车排气污染严重的城市，大气中臭氧浓度的增高，可视为光化学烟雾形成的信号。在高温或不利于扩散的气象条件下，烟雾会积聚不散是光化学烟雾污染形成的内因；日光辐射强度是光化学烟雾形成的外因，因此夏季是发生光化学烟雾的多发季节，一般每日下午 2:00 前后是光化学烟雾的峰值时刻。

通过对光化学烟雾形成的模拟实验，已经明确碳氢化合物和氮氧化物的相互作用形成光化学烟雾的机理如下。

① 污染空气中的 NO₂ 光解，是光化学烟雾形成的起始反应。



② 碳氢化合物被 HO*、O* 等自由基和强氧化能力的 O₃ 氧化，导致醛、酮、醇、酸和 PAN 等产物以及重要的中间产物——RO₂*、HO₂*、RCO* 等过氧化自由基的生成。

③ 过氧化自由基和 O₃ 引起 NO 向 NO₂ 的转化，形成循环，促进光化学烟雾的形成。

光化学烟雾成分复杂，对人有危害的是 O₃、PAN 和丙烯醛、甲醛等二次污染物，光化学烟雾对人体最突出的危害是刺激眼睛和上呼吸道黏膜，能引起眼睛红肿和喉炎。光化学烟雾对人体的另一些危害则与臭氧浓度有关。当大气中臭氧的浓度达到 200~1000 μg/m³ 时，会引起哮喘发作，导致上呼吸道疾患恶化，同时也刺激眼睛，使视觉敏感度和视力降低；浓度在 400~1600 μg/m³ 时，只要接触两小时就会出现气管刺激症状，引起胸骨下疼痛和肺通透性降低，使机体缺氧；浓度再高，就会出现头痛，并使肺部气道变窄，出现肺气肿、儿童肺功能异常等。接触时间过长，还会损害中枢神经，导致思维紊乱或引起肺水肿等。1955 年 9 月美国洛杉矶的一次光化学烟雾事件，在烟雾的浓度高达 0.65ppm (1ppm=10⁻⁶) 的两天里，65 岁以上的老人死亡四百余人。臭氧还可引起潜在性的全身影响，如诱发淋巴细胞染色体畸变、损害酶的活性和溶血反应、影响甲状腺功能、使骨骼早期钙化等。长期吸入将影响体内细胞的新陈代谢，加速衰老。

光化学烟雾还影响大气的能见度，对其他动物以及植物和人类使用的材料有伤害作用。

此外，污染空气中的二氧化硫 (SO₂) 会在光化学烟雾形成过程中，被 HO*、HO₂* 和 O₃ 等氧化而生成硫酸 (H₂SO₄) 和硫酸盐，成为光化学烟雾中气溶胶的重要成分。碳氢化合物中挥发性小的氧化产物也会凝结成气溶胶液滴而使能见度降低。

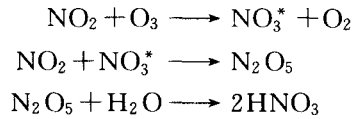
1.2.6 空气污染对环境的危害

空气污染对环境的影响主要体现在酸雨和江河湖泊的酸化，水源的酸化导致动植物及土壤等发生相应的变化，从而深刻地影响人类的生活。

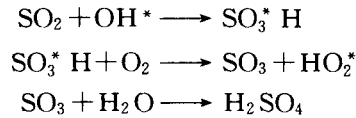
由于大气中的 CO₂ 的存在，依据其化学平衡，通常雨水的 pH 值在 5.6 左右。当降水的 pH 值低于 5.6 时，降水即为酸雨。虽然由于大气运动，世界各地的降雨 pH 值不尽相

同，而且和当地的污染程度并无统一的对应关系，但燃煤和汽车排气污染物中的 NO_x 、 SO_x 等是形成酸雨的元凶已是共识。这些酸性气体是由一些城市的工业化生产产生，随大气运动远程传输所致。通常认为酸雨形成的化学过程如下。

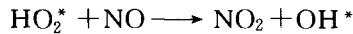
硝酸雨：



硫酸雨：



此外， HO_2^* 还促进 NO 向 NO_2 的转化，更进一步增加了硝酸雨的倾向。



据 2002 年 530 个城市降水监测结果，出现酸雨的城市占 48.9%，年均 pH 值低于 5.6 的城市有 171 个，占统计城市的 32.3%。我国酸雨地区主要包括江苏、上海、浙江、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、海南、贵州、四川、重庆、云南等地，南方的酸雨还和北方二氧化硫的大量排放有关，酸雨控制离不开二氧化硫等酸性气体的排放控制，为此我国划定了酸雨控制区和二氧化硫污染控制区，我国二氧化硫污染控制区主要包括北京、天津及河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、江苏、河南、陕西、甘肃、宁夏、新疆等地的部分城市。

1.2.7 温室气体排放对环境的影响

温室气体主要指二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4)、一氧化二氮 (N_2O)、臭氧 (O_3) 和氟氯烃类 (CFCs) 等。众所周知，二氧化碳是一种主要的温室效应气体，它能吸收波长在 $15\mu\text{m}$ 左右的红外线，而这一波长正是地球热辐射的波长，因而阻止了地球热量的散发从而造成近地层增温。应该指出，大气中少量温室气体的存在和恰到好处的温室效应，对人类是有益的。要是没有温室气体，近地层平均气温要比现在下降 33°C ，地球会因此变成一个寒冷的星球。

但是，近几十年来由于人口增加、工业发展、城市增多、森林砍伐等原因，大气中二氧化碳、甲烷、氟里昂等温室气体显著增加。有研究预测，地球的大气温度上升 $2\sim 3^\circ\text{C}$ ，将使海平面上升 $5\sim 7\text{m}$ ，由于大气温升，还将可能导致干旱及暴雨等灾害性天气。灾害性天气频繁发生，对社会和经济的发展将产生严重的影响。

虽然目前二氧化碳 (CO_2) 没有直接作为污染物被控制，但联合国气候变化框架公约《京都议定书》已经生效，它要求世界各国，特别是发达国家削减 CO_2 的排放量。因此，从燃烧学和燃烧技术的角度，需要关注节能，在获取足够能量的同时，尽量减少 CO_2 的排放。

以上介绍了一些主要的污染物及其危害，这些污染物之间还可以相互作用，对人类和环境产生二次污染及危害。除已被广泛关注的温室效应、酸雨、光化学烟雾外，它们还加剧了城市热岛现象和阳伞现象等大气热污染现象。

大城市中人口密集，工厂企业众多，每天产生大量的热，机动车辆、工厂等还向大气排出大量烟尖微粒和二氧化碳，局部改变了大气的成分，阻止城市热量的扩散，一定程度上加剧了城市气温的提高，使大城市气温比周边地区气温高，在用等温线表示的气温图上，城市的气温呈岛状分布，因而被称为“热岛”。同时，在一定的大气条件下，含有一定污染物的

空气受热向上升起，到高空后被冷却向四周回流，形成循环，像一把巨大阳伞笼罩在城市上空，一方面将部分太阳辐射反射回宇宙空间，削弱了到达地面的太阳辐射能，使地面接受的太阳能减少；另一方面吸湿性的微尘又作为凝结核，促使周围水汽在它上面凝结，导致低云、雾增多，空气能见度下降，影响城市交通等人们日常的生活活动，因而称“阳伞效应”。

1.3 空气污染源

能够造成空气污染的污染源有很多，如工业和生活燃煤、垃圾焚烧等。就汽车而言，在汽车的一个生命周期，将对空气及环境产生四方面的污染：①生产汽车的原材料钢材、使用燃料汽油等在生产过程中产生废渣、废水、废气；②汽车制造过程中的油漆喷涂工序保护不当造成环境污染；③汽车使用过程中产生尾气与颗粒物污染等；④汽车报废处理不当对环境造成污染。汽车在使用过程中，燃料燃烧所造成的空气污染，即汽车发动机尾气排放污染，主要包括 NO_x 、 CO 、 HC 、 SO_x 、 PM 。近年来环保部门的研究表明，我国部分大中城市的空气污染已由过去燃煤型转化为汽车尾气污染型。

在机动车中一般来说汽油车的性能要好一些，而柴油车的燃料效率要高一些，但很难简单地说明哪种类型的机动车污染更少，这不仅取决于所关注的污染物种类，而且取决于发动机是否安装了有效的污染控制装置（如催化转换器等），以及发动机的保养水平等多种因素。表 1-5 给出环境部门对汽车排放情况的评价。显然安装三元催化器的汽油车比未装三元催化器的汽油车排放的污染物要少得多；柴油车的颗粒物排放较高，但柴油车的燃油经济性好，相应的 CO_2 排放减少。

表 1-5 汽油车和柴油车污染物排放情况比较

污 染 物	未装三元催化 器的汽油车	安装三元催化 器的汽油车	未装氧化催化 器的柴油车	安装氧化催化 器的柴油车
受控制的污染物				
氮氧化物	高	低	中等	中等
碳氢化合物	高	中等	较高	低
一氧化碳	高	较高	中等	中等
颗粒物	中等	低	高	较高
尚未控制的污染物				
乙醛	高	中等	较高	低
苯	高	较高	中等	低
丁二烯	高	中等	较高	低
多环芳烃	较高	低	高	中等
二氧化碳	较高	高	低	中等
二氧化硫	低	低	高	高

据有关统计数据分析表明，2005 年底全国民用汽车保有量已接近 3000 万辆，千人均在 24 辆左右。我国的汽车工业正处于高速度发展时期，表 1-6 统计了 1990~2005 年汽车及其其中轿车的生产情况，其中在 2003 年实现了产销超过 440 万辆，2004 年突破了 500 万辆，2005 年产销量均超过 570 万辆，成为新的历史记录。

与美国等发达国家相比，我国的汽车保有总量虽然不大，但机动车大多集中在城市地区，如北京的汽车保有量为 340 万辆。在用车的车况较差，排放水平较高，单车排出有害物质是发达国家汽车的几倍，而且汽车的驶出率高达 80%，运行时间也长，因此所产生的有害排放特别多。汽车排放物已造成城市空气质量的下降，在有些城市汽车已成为污染的主要分担者。