



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

REDONGLI SHEBEI PAIFANG
WURAN JI KONGZHI

热动力设备排放 污染及控制

龚金科 主 编

鄂加强 谭理刚 邓元望 副主编

吴义虎 周乃君 主 审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Thermal Energy & Power



热动力设备排放 污染及控制

主编：王 强
副主编：王 强、王 强、王 强
编 者：王 强、王 强、王 强

中国水利水电出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

REDONGLI SHEBEI PAIFANG
WURAN JI KONGZHI

热动力设备排放 污染及控制

主 编 龚金科
副主编 鄂加强 谭理刚 邓元望
主 审 吴义虎 周乃君



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

Thermal Energy & Power

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书根据国内外最新资料和编者的研究成果,系统阐述了热动力设备排放污染物的危害、生成机理和影响因素;详细论述了发动机、工业锅炉和工业炉等热动力设备的内净化技术和后处理净化技术;在此基础上,简要提出了热动力设备排放污染物的一般净化方案,并对其进行了分析;此外还扼要介绍了热动力设备排放污染物测试方法。

本书可作为热能与动力工程、车辆工程、环境工程、化学工程等相关专业本科生和研究生教材,也可作为相关工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

热动力设备排放污染及控制/龚金科主编. —北京:中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 4984 - 8

I. 热... II. 龚... III. 动力设备—污染控制—高等学校—教材 IV. X77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 055986 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 7 月第一版 2007 年 7 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 354 千字
印数 0001—3000 册 定价 23.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

随着经济的迅猛发展,人们对赖以生存的环境要求越来越高,环境污染问题已成为世界的热点问题,环境保护工作越来越受到各国政府重视。热动力设备所排放的污染物,一方面造成环境污染,影响生态平衡;另一方面,也因燃料燃烧不完全、燃烧品质不高,造成大量能源浪费。因此,提高热动力设备燃烧品质,降低热动力设备排放污染,不仅可以保护生态环境,而且可以促进资源利用,有着巨大的经济效益和社会效益。所以,热动力设备排放污染控制技术已成为热动力设备设计人员必须具备的专业素养。

本书作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,在综合国内外最新资料和编者研究成果的基础上,系统地介绍了相关的新知识、新技术和新内容,使其具有很好的知识正确性、内容先进性、结构合理性、文字可读性、使用灵活性和教学适用性,可以在很大程度上促进我国热动力设备排放污染控制技术的进一步发展。

本书由湖南大学博士生导师龚金科教授担任主编,湖南大学鄂加强、谭理刚、邓元望担任副主编。第1、3、4、6章由鄂加强编写,第2、7、8章由谭理刚编写,第5章由邓元望编写,全书由龚金科教授统稿。在编写过程中,得到了杨靖、李芷源、刘孟祥、朱浩、杨小龙等的大力协助。长沙理工大学博士生导师吴义虎教授和中南大学博士生导师周乃君教授对全书进行了认真审阅,在此一并表示感谢!

感谢湖南省自然科学基金重点项目[06JJ20018]对本书编写的资助。

受编者水平所限,书中疏漏与不足之处在所难免,恳请读者和同仁们批评指正。

编 者

2007年5月

目 录

续文等参

前言

第1章 绪论	1
1.1 大气污染概况	1
1.2 热动力设备排放污染物及危害	7
1.3 热动力设备排放污染主要控制技术	11
第2章 热动力设备排放污染物的生成机理和影响因素	12
2.1 一氧化碳	12
2.2 碳氢化合物	14
2.3 氮氧化物	18
2.4 微粒	25
2.5 烟尘	30
2.6 硫氧化物	34
第3章 热动力设备的排放特性	37
3.1 发动机的排放特性	37
3.2 工业锅炉的排放特性	42
3.3 工业炉的排放特性	48
第4章 热动力设备内净化技术	53
4.1 汽油机机内净化技术	53
4.2 柴油机机内净化	74
4.3 工业锅炉内净化技术	93
4.4 工业炉内净化技术	111
第5章 热动力设备后处理净化技术	122
5.1 汽油机后处理净化技术	122
5.2 柴油机后处理净化技术	135
5.3 工业锅炉后处理净化技术	152
5.4 工业炉后处理净化技术	173
第6章 燃料与排放	177
6.1 燃料对热动力设备排放的影响	177
6.2 热动力设备代用燃料	189
第7章 热动力设备排放污染物净化方案及分析	198
7.1 发动机排放污染物一般净化方案	198
7.2 工业锅炉和工业炉烟气脱硫技术方案	202
第8章 热动力设备排放测试	206
8.1 热动力设备排放污染物取样系统	206

第1章 绪 论

本章主要内容：介绍环境污染现状，特别是与发动机、工业锅炉和工业炉等为主体的热动力设备排放污染物相关的大气污染情况。归纳了发动机、工业锅炉以及工业炉等为主体的热动力设备排放污染物对人类和自然的危害，并对热动力设备排放污染控制技术进行了概括。

1.1 大气污染概况

1.1.1 大气环境保护的紧迫性

在工业革命时期，烟囱高耸、浓烟滚滚被当作工业文明和社会进步的象征。当人类向着征服大自然的目标前进时，一部破坏生态环境的历史也同时被记录下来。环境是人类生存发展的物质基础和制约因素。人口的增长要求工农业迅速发展，从环境中摄取食物、资源、能量的数量必然要增大，然而，环境的承载能力和环境容量是有限的，如果人口的增长、生产的发展不考虑环境条件的制约，超出了环境允许的极限，就势必会导致环境污染与破坏，造成资源的枯竭和对人类健康的损害。

目前，全球的环境问题主要表现为温室效应、臭氧层的耗损与破坏、酸雨蔓延、能源危机、生物多样性的减少、森林锐减、土地沙漠化、水污染和海洋污染以及危险性废物越境转移等。这些环境问题带来的危害是明显的。温室效应导致全球变暖，降水量重新分配；臭氧层的耗损与破坏使皮肤癌和角膜炎患者增加；酸雨蔓延改变了土壤性质和结构；生物多样性的减少、森林锐减和土地沙漠化让原本富饶美丽的世界变得满目疮痍。总之，生态平衡的破坏，环境的恶化严重危害人体健康，发展下去最终会使自然界失去供养人类生存的能力。近些年来，人们已经开始认识到环境保护的重要性，并给予了广泛的关注。1992年6月在巴西里约热内卢召开的联合国环境与发展大会上，通过了《里约环境与发展宣言》、《二十一世纪议程》、《关于森林问题的原则声明》等重要文件，充分体现了当今人类社会可持续发展的新思想，反映了关于环境与发展领域协作的全球共识和最高级别的政治承诺。现在，各国政府正在按照制定的可持续性发展战略、计划和政策进行环境保护，人类即将进入合理利用和保护环境的新时代。

诸多环境问题中，大气污染已成为最为关注的问题之一。大气与地球上各种生命的繁衍息息相关，人类的生存离不开大气。然而，随着人类社会的发展，人类活动或自然过程使得某些物质进入了大气中，当它们具有足够的浓度，经过足够的时间后，就可能危害到人体的舒适和健康，危害到生态环境的平衡，这就是所谓的大气污染。人类的活动不仅包括生产活动，而且也包括日常的生活活动；自然过程则包括火山活动、山林火灾、土壤和岩石的风化等。实际上，自然过程造成的大气污染经过一定时间后可以被自动消除，所以大气污染主要是人类活动造成的。温室效应、臭氧层的耗损与破坏、酸雨蔓延是大气污染的主要表现形式。

1.1.2 重大的大气污染事件

以往人类在提高自己生活水平的过程中对大气污染并不是特别介意，但是工业革命以后，由于蒸汽机等热动力设备的发明与广泛使用，化石燃料逐渐上升为主要能源。在社会生产力得到飞速发展的同时，也促进了化石燃料消费的加速，同时随着人口的增加，在人口集中的城市周边和工业地区，发生了很严重的环境问题。特别是进入 20 世纪后，世界各工业国家相继发生了一些重大的大气污染事件，才使人们认识到防止大气污染的重要性。

一、比利时 Muse 河谷工业区的大气污染事件

在比利时境内沿 Muse 河 24km 长的一段河谷地带，即 Muse 河谷的列日镇和于伊镇之间，两侧山高约 90m。许多重型工厂分布在河谷上，包括 3 个炼油厂、3 个金属冶炼厂、4 个玻璃厂和 3 个炼锌厂，还有电力、硫酸、化肥厂和石灰窑炉，工业区全部处于狭窄的盆地中。

1930 年 12 月 1 日~15 日，整个比利时大雾笼罩，气候反常。由于特殊的地理位置，Muse 河谷上空出现了很强的逆温层。通常，气流上升越高，气温越低。但当气候反常时，低层空气温度就会比高层空气温度还低，发生“气温的逆转”现象，这种逆转的大气层叫做“逆转层”。逆转层会抑制烟雾的升腾，使大气中烟尘积存不散，在逆转层下积蓄起来，无法对流交换，造成大气污染。

在这种逆温层和大雾的作用下，Muse 河谷工业区内 13 个工厂排放的大量烟雾弥漫在河谷上空无法扩散，有害气体在大气层中越积越厚，其积存量接近危害健康的极限。第 3 天开始，在二氧化硫和其他几种有害气体以及粉尘污染的综合作用下，河谷工业区有上千人发生呼吸道疾病，其中 63 人死亡，为历史同期正常死亡人数的 10.5 倍。发病者包括不同年龄的男女，其主要发病症状是咳嗽与呼吸短促，同时也伴随着流泪、喉痛、声嘶、胸口窒闷、恶心、呕吐等症状。许多家畜在此次事件中也未能幸免于难，纷纷死去。

事件发生以后，虽然有关部门立即进行了调查，但一时尚不能确定有害物质。有人认为是氟化物，有人认为是硫的氧化物，说法不一。以后，又对当地排入大气的各种气体和烟雾进行了研究分析，排除了氟化物致毒的可能性，认为硫的氧化物——二氧化硫气体和三氧化硫烟雾的混合物是主要致害的物质。据推测，事件发生时工厂排出有害气体在近地表层积累。据费克特博士在 1931 年对这一事件所写的报告，推测大气中二氧化硫的浓度约为 $25 \sim 100 \text{ mg/m}^3$ 。空气中存在的氧化氮和金属氧化物微粒等污染物会加速二氧化硫向三氧化硫转化，加剧对人体的刺激作用。同时，具有生理惰性的烟雾通过把刺激性气体带进肺部深处，也起了一定的致病作用。

这次事件曾轰动一时，虽然日后类似这样的烟雾污染事件在世界很多地方都发生过，但 Muse 河谷烟雾事件却是 20 世纪最早发生的大气污染惨案。

二、美国宾夕法尼亚州 Donora 市的大气污染事件

Donora 市大约有 14000 人，该市位于距匹兹堡南部约 45km 的一个山谷似的盆地中。1948 年 10 月 26 日，Donora 市在逆温和大风的天气下发生了浓雾（烟雾），一直持续到 10 月 31 日。当时从炼铁厂、炼锌厂等处排放的二氧化硫浓度达到了 $0.5 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-6}$ （这是后来推定的浓度，当时并没有测定），近 40% 的市民出现咳嗽、呼吸困难等症状，其中大约 10% 是重症患者。总的死亡人数为 18 人，年龄在 52~84 岁之间，平均 65 岁。

三、英国伦敦的大气污染事件

英国伦敦在手工业时期就曾出现过燃煤造成的大气污染,从那时起至20世纪50年代初先后发生多起由于燃煤造成的烟雾中毒事件。20世纪50年代以前,伦敦有燃煤发电厂,离市中心不远处有许多工厂。大多数家庭用烧煤来取暖,以煤为动力的蒸汽机车拉着一节节列车进出首都,对小汽车和卡车产生的废气几乎没有控制措施。从所有上述的这些污染源产生的碳、硫化物和其他化学烟雾充斥在空气中,在多雾的天气条件下,化合物与雾混合,会产生污染严重的“烟雾”覆盖层。

1952年12月5日~9日,伦敦上空受高压的影响,地面处于无风状态,发生了前所未有的浓雾。雾云在城市上空悬浮了5天,空气逐步变得更脏、毒性更强。由于在50~150m高空出现逆温层,使得大量烟尘和二氧化硫等污染物被封闭在逆温层下,污染物不能得到扩散,造成了迅速的积累,烟尘浓度高达 $4.5\text{mg}/\text{m}^3$,二氧化硫浓度高达 $3.8\text{mg}/\text{m}^3$,均超过平时的5倍。烟雾使数千受害者患了支气管炎、气喘和其他影响肺部的疾病。最后,到12月10日烟雾散去时,估计已有4000人死亡,其中多数是年长者,两个月内又有8000多人死去。

燃煤是引起这起惨祸的主要原因,这一事实使得英国政府大为震惊。英国政府于1956年制定并颁布了《大气净化法》(Clean Air Act),并对从家庭产生的有毒气体也进行了限制。

四、洛杉矶光化学烟雾事件

美国洛杉矶是西部太平洋沿岸的一个海滨城市,前面临海,背后靠山。从地形来说,洛杉矶地处太平洋沿岸的一个口袋形地带之中,只有西面临海,其他三面环山,形成一个直径约50km的盆地,空气在水平方向流动缓慢。虽然在海上有相当强劲的通常从西北方吹来的地面风,但此风并不穿过海岸线。在海岸附近和沿着近乎是东西走向的海岸线上吹的是西风或西南风,而且风力弱小。这些风将城市上空的空气推向山岳封锁线,并与沿着加利福尼亚州海岸向南方和东方流动的一股名叫加利福尼亚潮流的大洋流联合,促成了洛杉矶上空每年约有300天的强大持久性的逆温层,它们犹如帽子一样封盖了地面的空气,并使大气污染物不能上升到越过山脉的高度。

自从1936年在洛杉矶开发石油以来,特别是第二次世界大战后,洛杉矶的飞机制造和军事工业迅速发展,洛杉矶已成为美国西部地区的重要海港,其工商业的发达程度仅次于纽约和芝加哥,是美国的第三大城市。随着工业发展和人口剧增,洛杉矶在20世纪40年代初就有汽车250万辆,每天消耗汽油1600万升。到20世纪70年代,汽车增加到400多万辆。市内高速公路纵横交错,占全市面积的30%,每条公路平均通行的汽车流量每天达16.8万辆。由于汽车漏油、汽油挥发、不完全燃烧和汽车排气,每天向城市上空排放大量石油烃废气、一氧化碳、氮氧化物和铅烟(当时所用汽车为含四乙基铅的汽油)。这些排放物在阳光的作用下,特别是在每年5月份~10月份的夏季和早秋季节的强烈阳光作用下,发生光化学反应,生成淡蓝色光化学烟雾。这种烟雾中含有臭氧、氮氧化物、乙醛和其他氧化剂,滞留市区久久不散。

1943年以来,每年5月~10月期间经常出现烟雾几天不散的严重污染。前后经过约八年,到20世纪50年代,人们才发现洛杉矶烟雾是由汽车排放物造成的。1955年9月,由于大气污染和高温,烟雾的浓度高达 0.65×10^{-6} 。在两天里,65岁以上的老人死亡400余

人，为平时的3倍多；许多人眼睛痛、头痛、呼吸困难。从20世纪50年代开始，洛杉矶当地政府每天向居民发出光化学烟雾预报和警报。光化学烟雾中的氧化剂以臭氧为主，所以常以臭氧浓度高低作为警报的依据。1955年~1970年，洛杉矶曾发出臭氧浓度的一级警报80次，每年平均5次，其中1970年高达9次。1979年9月17日，洛杉矶大气保护局发出了“烟雾紧急通告第二号”，当时空气中臭氧含量已经超过了 0.35×10^{-6} ，几乎达到了“危险点”。洛杉矶已经失去了它美丽舒适的环境，有了“美国的烟雾城”称号。

五、日本四日市的大气污染事件

1955年~1960年间，在四日市的盐滨地区，由包括炼油厂在内的与石油化学有关的10家公司组成的联合企业开始了多种石油产品的生产，接着午起地区也建设了同样的联合企业。1963年10月，对不同企业的二氧化硫排放情况进行了调查，结果是火力发电占58.2%，石油精炼占24%，石油化学工业占9.7%，一般化学工业占4.7%，陶瓷工业占2.0%，其他占1.4%。联合企业使用的燃料中石油燃料占87%，因此大部分二氧化硫是由石油燃料中所含的硫产生的。1961年，石油、化工、冶金工业较集中的日本四日市发生“四日市公害病”——哮喘病，到1970年止，受害者达2000人以上。后来由于采取燃料脱硫、排烟脱硫、使用低硫燃料等措施，四日市大气中二氧化硫浓度开始逐步降低，到1976年，该地区二氧化硫浓度降低到所规定的目标值 0.017×10^{-6} 以下，之后逐年减少。由于大气污染得到了显著改善，1995年6月，四日市受到了联合国环境规划署的表彰。

除此以外，19世纪后期，自1893年开始的50年间，日本足尾铜矿冶炼厂排放废气造成大片田园荒芜，几十人流离失所。日本足尾铜矿发生了一起震惊世界的大气污染事件；欧洲地区由于燃煤造成大气污染，使北欧许多国家降酸雨，多次引起国际争端；我国一些城市的大气污染已影响到儿童的肺功能。世界银行20世纪末一项研究表明：在我国主要城市中，每年约有17.8万人由于大气污染的危害过早死亡，每年由于大气污染致病而造成的工作日损失达740万人/年。我国重庆地区在1982年入夏后连降酸雨，雨后2万亩水稻叶子突然枯黄，状如火烤，几天后枯死。近年来除了污染物质排放源附近地区的污染以外，包括越境大气污染在内的地球规模的大气污染，如臭氧层破坏、酸雨、温室效应等问题也被广泛关注。也就是说，过去的大气污染可以分清污染者和受害者，但在经历了既是污染者又是受害者的时代后，整个地球的大气环境污染已成为一个很大的问题，影响着人类以及其他生物生存。

1.1.3 工业化过程污染发生源的分类和特征

工业化过程中产生的污染物质如图1-1所示，大致可分为由工业活动和人类生活产生的

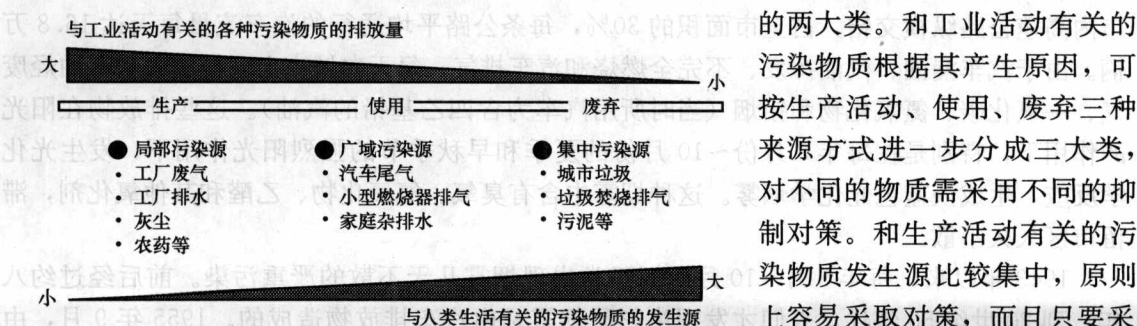


图1-1 工业化过程中污染发生源分类

和工业活动有关的污染物质根据其产生原因，可按生产活动、使用、废弃三种来源方式进一步分成三大类，对不同的物质需采用不同的抑制对策。和生产活动有关的污染物质发生源比较集中，原则上容易采取对策，而且只要采取一次有效措施，就可得到明

显的防治效果。

一、大气污染的一般分类

大气污染按其污染的范围不同,可分为局部污染、区域性污染和全球性污染。

(1) 局部污染——出现在一个城市或更小区域范围的空气污染,如北京、广州、兰州等城市的空气污染,其距离尺度一般小于 100km。

(2) 区域性污染——范围在 500km 以上的地区出现的空气污染,以及这些污染物的跨国输送,最典型的是酸雨问题,如北美、欧洲、中国西南三大酸雨区。

(3) 全球性污染——污染范围在数千公里以上的大气环境问题,如温室气体排放引起的全球气候变化,以及空调制冷剂和有机溶剂在使用中排放的氯氟烃(CFCs)对地球平流层臭氧的破坏等。

二、大气污染源

大气污染的污染源可分为天然污染源和人为污染源。天然污染源是指自然界向大气排放污染物的地点或地区,如排放灰尘、二氧化硫、硫化氢等污染物的活火山、自然逸出的瓦斯气,以及发生森林火灾、地震等自然灾害的地方。

人为污染源按人们的社会活动功能不同可分为生活污染源、工业污染源、交通污染源等。汽车成为主要的运输和代步工具后,在提高社会生产效率、改善人们生活质量的同时,也消耗了大量的能源,排放的尾气也成了主要的交通污染源。

1.1.4 环境空气质量标准

包围着地球的空气为人类生存提供了适宜的物理环境。清洁的空气是由氮气、氧气和二氧化碳等气体组成的,它们的体积百分比分别是 78.06%、20.95%、0.93%,约占空气总量的 99.94%,其他气体总和不到千分之一。但是,随着热动力设备的大量有害物质的排放,空气的正常组成正在被改变,人们不知不觉生活在受到污染的空气中了。为了改善环境空气质量,创造清洁适宜的环境,保护人体健康,我国根据《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国大气污染防治法》制定了 GB3095—1996《环境空气质量标准》。这个标准规定了二氧化硫(SO₂)、总悬浮颗粒物(TSP)、可吸入颗粒物(PM₁₀)、氮氧化物(NO_x)、碳氧化物等九种污染物的浓度限值,如表 1-1 所示。这个标准是评价空气质量好坏的科学依据。

表 1-1

各项污染物浓度限值

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 (PM ₁₀)	年平均	0.01	0.10	0.15	
	日平均	0.05	0.15	0.25	
氮氧化物 (NO _x)	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	

续表

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	
二氧化氮 (NO ₂)	年平均	0.04	0.04	0.08	mg/m ³ (标准状态)
	日平均	0.08	0.08	0.12	
	1h 平均	0.12	0.12	0.24	
一氧化碳 (CO)	年平均	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			
	年平均	1.00			
苯并 [a] 芘 B [a] P	日平均	0.01			μg/m ³ (标准状态)
氟化物 (F)	日平均	7 ^①			μm/(dm ² ·d)
	1h 平均	20 ^①			
	月平均	1.8 ^②	3.0 ^③		
	植物生长季平均	1.2 ^②	2.0 ^③		

①适用于城市地区。

②适用于牧业区和牧业为主的半农半牧区、蚕桑区。

③适用于农业和林业区。

我国根据环境卫生标准、各地大气污染状况、国家科技经济发展规划和大气环境的规划目标，按照分级分区管理的原则，将大气环境质量标准划分为三级，一类区执行一级标准，二类区执行二级标准，三类区执行三级标准。

一级标准：为保护自然生态和人群健康，在长期接触情况下，不发生任何危害性影响的空气质量要求。

二级标准：为保护人群健康和城市、乡村的动、植物在长期和短期的接触情况下，不发生伤害的空气质量要求。

三级标准：为保护人群不发生急、慢性中毒和城市一般动、植物正常生长的空气质量要求。

衡量某个区域的空气质量达到几级标准，主要就是看这个地方空气中各种污染物（如总悬浮颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等）的浓度达到几级标准。表 1-2 给出了 2003 年北京市大气主要污染物年日均值。

表 1-2

2003 年北京市大气主要污染物年日均值

年 份	二氧化硫 (mg/m ³)	二氧化氮 (mg/m ³)	可吸入颗粒物 (mg/m ³)	总悬浮颗粒物 (mg/m ³)	一氧化碳 (mg/m ³)
2000 年	0.067	0.076	0.166	0.373	2.5
2003 年	0.061	0.072	0.141	0.252	2.4
2003 比 2002 降低	-9%	-0.3%	-15.1%	-32.7%	-4%
国家年平均 (二级标准)	0.060	0.040	0.100	0.200	—

最近几年,我国对环境保护的投入不断加大,图1-2是1998年~2003年北京市政府针对环保的投资情况。通过政府和社会的努力,我国城市空气质量总体上也有所好转。2003年监测的340个城市中,142个城市达到国家环境空气质量二级标准(居住区标准),占41.7%,比2002年增加7.9个百分点;空气质量为三级的城市有107个,占31.5%,比2002减少3.5个百分点;劣于三级标准的城市有91个,占26.8%,比2002年减少4.4个百分点。

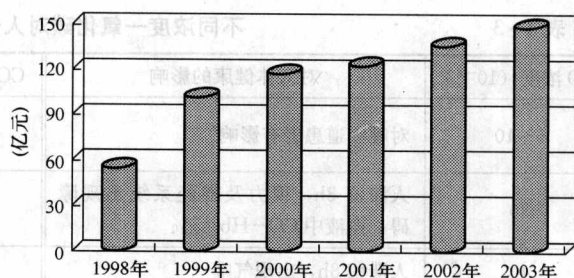


图1-2 北京市政府近年来的环保投资情况

1.2 热动力设备排放污染物及危害

当前世界各国主要能源来源于矿物燃料,矿物燃料燃烧过程中向大气排出大量的有害物质。我国是世界上大气污染最严重的国家之一,大气污染是我国环境问题中的一个主要问题。当前我国大气污染状况是多数城市大气污染严重,危害严重的主要污染物是燃煤排放的尘和 SO_2 。尘污染是全年性和全国性的, SO_2 污染主要发生在烧高硫煤地区和北方城市的冬季采暖期,以及长江以南,特别是西南烧高硫煤地区。通常,除由于燃烧产生的粉尘、悬浮物微粒和 SO_2 三种主要污染物外,热动力设备排放的主要污染物有一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO_2)、碳氢化合物(包括苯、苯并[a]芘)、硫化氢、炭黑和灰尘以及二次污染光化学烟雾等。

1.2.1 一氧化碳及危害

一氧化碳是排放量最大的大气污染物之一,它主要是碳氢化合物在空气中燃烧不完全时的产物。一氧化碳是无色、无味、无臭的窒息性毒气,人们不易察觉其存在,所以危险性更大。由于其和血液中有输氧能力的血红蛋白(Hb)的亲合力比氧气(O_2)和 Hb 的亲合力大200~300倍,因而一氧化碳能很快和 Hb 结合形成碳氧血红蛋白(CO-Hb),使血液的输氧能力大大降低。高浓度的一氧化碳能够引起人体生理和病理上的变化,使心脏、大脑等重要器官严重缺氧,引起头晕、恶心、头痛等症状,严重时会使心血管工作困难,直至死亡。一氧化碳还会减慢氧合血红蛋白的解离过程,所以血液中即使载有几倍于身体所需的氧气,也会因不能释放出来而发生缺氧症。此外,一氧化碳对支配肌肉运动的神经末梢会起麻痹的作用,因此中毒初期,尽管患者心里明白,但手足已不听使唤,要想采取自救措施(如开门窗、逃离现场)已不可能,所以它的危险性更大。不同浓度一氧化碳对人体健康的影响见表1-3。热动力设备排放的废气中,一氧化碳是矿物燃料燃烧的中间产物,主要是在局部缺氧或低温条件下由于矿物燃料不能完全燃烧而产生的。当热动力设备矿物燃料过量或者与助燃空气混合不均匀时,燃料不能充分燃烧,废气中一氧化碳含量会明显增加。

表 1-3 不同浓度一氧化碳对人体健康的影响

CO 浓度 (10^{-6})	对人体健康的影响	CO 浓度 (10^{-6})	对人体健康的影响
5~10	对呼吸道患者有影响	250	2h 接触, 头痛, 血液中 CO-Hb=40%
30	人滞留 8h, 视力及神经系统出现障碍, 血液中 CO-Hb=5%	500	2h 接触, 剧烈心痛、眼花、虚脱
40	人滞留 8h, 出现气喘	3000	30min 即死亡
120	1h 接触, 中毒, 血液中 CO-Hb>10%		

1.2.2 氮氧化物及危害

造成大气污染的氮氧化物 (NO_x) 是 NO 及 NO_2 的总称。热动力设备排放的废气中, 氮氧化物的排放量取决于燃烧温度、燃烧时间和空燃比等因素。燃烧过程排放的氮氧化物中 95% 以上可能是一氧化氮 NO , NO_2 只占少量。 NO 是无色无味气体, 只有轻度刺激性, 毒性不大, 高浓度时会造成中枢神经的轻度障碍, NO 可被氧化成 NO_2 。 NO 与血液中的血红素的结合能力比 CO 还强。 NO_2 是一种具有腐蚀性的红棕色气体, 对呼吸道有强烈的刺激作用, 对人体影响特别大。当其体积含量在 100×10^{-6} 以上时, 几分钟就能致人和动物死亡,

表 1-4 不同浓度 NO_2 对人体健康的影响

NO_2 的浓度 (10^{-4})	对人体健康的影响
1	闻到臭味
5	闻到强臭味
10~15	10min 后, 眼、鼻、呼吸道受到刺激
50	1min 内呼吸困难
80	3min 后, 感到胸闷、恶心
150	在 30~60min 内因肺水肿而死亡
250	很快死亡

若吸入浓度为 5×10^{-6} 的二氧化氮, 几分钟就能危害呼吸系统。 NO_2 吸入人体后和血液中血红素蛋白 Hb 结合, 使血液输氧能力下降, 会损害心脏、肝、肾等器官, 其具体影响见表 1-4。同时, 二氧化氮还是产生酸雨和引起气候变化、产生烟雾的主要原因。另外, HC 和 NO_x 在大气环境中受强烈太阳光紫外线照射后, 会生成

新的污染物——光化学烟雾。

1.2.3 二氧化硫及危害

二氧化硫是大气中的主要污染物之一, 是衡量大气是否遭到污染的重要标志。世界上有很多城市发生过二氧化硫危害的严重事件, 使很多人中毒或死亡。我国一些城镇的大气中二氧化硫的危害普遍而又严重。

二氧化硫进入呼吸道后, 因其易溶于水, 故大部分被阻滞在上呼吸道, 在湿润的黏膜上生成具有腐蚀性的亚硫酸、硫酸和硫酸盐, 使刺激作用增强。上呼吸道的平滑肌内因有末梢神经感受器, 遇刺激就会产生窄缩反应, 使气管和支气管的管腔缩小, 气道阻力增加。上呼吸道对二氧化硫的这种阻留作用, 在一定程度上可减轻二氧化硫对肺部产生刺激作用。当二氧化硫被吸收进入血液后, 对全身产生毒作用, 它能破坏酶的活力, 从而明显地影响碳水化合物及蛋白质的代谢, 对肝脏有一定损害。动物实验证明, 二氧化硫慢性中毒后, 机体的免疫力受到明显抑制。二氧化硫浓度为 $10 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$ 时, 呼吸道纤毛运动和黏膜的分泌功能均受到抑制; 浓度为 20×10^{-6} 时, 引起咳嗽并刺激眼睛; 浓度为 100×10^{-6} 时, 支气管和肺部将出现明显的刺激症状, 使肺组织受损; 浓度为 400×10^{-6} 时, 可使人呼吸困难。

二氧化硫与飘尘一起被吸入,飘尘气溶胶微粒可把二氧化硫带到肺部,使毒性增加3~4倍。若飘尘表面吸附金属微粒,在其催化作用下,使二氧化硫氧化为硫酸雾,其刺激作用比二氧化硫增强约1倍。长期生活在大气污染的环境中,由于二氧化硫和飘尘的联合作用,可促使肺泡壁纤维增生,如果增生范围波及广泛,形成肺纤维性变,发展下去可使纤维断裂形成肺气肿。二氧化硫可以增强致癌物苯并[a]芘的致癌作用。据动物试验,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因子的发病率,在短期内即可诱发肺部扁平细胞癌。因此,二氧化硫具有促癌作用。

此外,由于植物有庞大的叶面积同空气接触并进行活跃的气体交换,故二氧化硫会对植物造成严重影响。浓度低于 0.3×10^{-6} 时即开始对植物产生影响,低浓度长时间(几天或几周)的作用会抑制叶绿素的生长,使叶子慢性损伤而变黄;高浓度短时间的作用可造成急性叶损伤。故在未经处理的硫酸厂或有色金属冶炼厂周围的原野上,往往常年一片桔黄色,这是因为长期污染可使植物无法生长。所以,二氧化硫对植物能造成严重影响。

另外,二氧化硫气体可以穿窗入室,或渗入建筑物的其他部位,使金属制品或饰物变暗,使织物变脆破裂,使纸张变黄发脆。

1.2.4 碳氢化合物及危害

碳氢化合物 HC(也称烃)包括未燃和未完全燃烧的燃油、润滑油及其裂解产物和部分氧化物,如苯、醛、酮、烯、多环芳香族碳氢化物等200多种复杂成分。饱和烃一般危害不大,甲烷气体无毒性,乙烯、丙烯和乙炔主要会对植物造成伤害。但是,不饱和烃却有很大的危害性。苯是无色类似汽油味的气体,可引起食欲不振、体重减轻、易倦、头晕、头痛、呕吐、失眠、黏膜出血等症状,也可引起血液变化,红细胞减少,出现贫血,还可导致白血病。而甲醛、丙烯醛等醛类气体也会对眼、呼吸道和皮肤有强刺激作用,超过一定浓度时,会引起头晕、恶心、红细胞减少、贫血和急性中毒。应当引起特别注意的是带更多环的多环芳香烃,如苯并[a]芘及硝基烯都是强致癌物。同时,烃类成分还是引起光化学烟雾的重要物质。

1.2.5 硫化氢及危害

在以煤粉为燃料的工业锅炉以及对含硫伴生矿进行冶炼的工业炉窑中,往往都伴有硫化氢的产生。

硫化氢是一种无色气体,有特殊的臭蛋气味,能溶解于水、酒精、乙醚等液体。标准状况下的密度是 1.5392g/L ,是空气的1.19倍。硫化氢化学性质不稳定,在空气中燃烧产生淡蓝色火焰。与空气混合时,其爆炸极限的体积比是 $4.3\% \sim 2.46\%$ 。硫化氢可以发生多种氧化反应,生成二氧化硫、硫酸或单质硫。硫化氢既是一种刺激性气体,也是一种窒息性气体。它能直接刺激眼部的湿润组织,导致角膜结膜炎。吸入硫化氢会对全部呼吸道产生刺激作用,而深部结构受损最严重,结果可能产生肺气肿。在浓度为 $1500 \sim 3000\text{mg/m}^3$ ($1000 \sim 2000 \times 10^{-6}$)时硫化氢迅速经肺进入血液,立即诱发呼吸急速,随后出现呼吸停止(窒息)。更高浓度的硫化氢会使呼吸中枢产生麻痹,除非迅速重建自发呼吸或极限人工呼吸,否则其后果必然致死。硫化氢具有典型的臭蛋气味,这种气味的感觉阈值因人而异,相当程度上取决于个体的敏感性。在实验条件下它的范围为 $0.0007 \sim 0.20\text{mg/m}^3$ ($0.0005 \sim 0.13 \times 10^{-6}$),约在 225mg/m^3 (150×10^{-6})以上时硫化氢会使嗅觉器官产生麻痹,因而闻不出它的恶臭气味。

硫化氢主要作用于中枢神经系统,对眼、上呼吸道黏膜有较强的刺激,易引起急性中

毒。硫化氢浓度低时，发生头昏、头痛、恶心、呕吐、全身虚弱、呼气有硫化氢味、瞳孔缩小、反应迟钝、发绀、脉搏频数，有时会发生肺炎、肺水肿、尿中有蛋白出现。硫化氢浓度高时，吸入大量可使意识突然丧失、昏迷、窒息而死亡。由此可见，硫化氢的危害是非常大的。

1.2.6 烟尘（微粒）及危害

烟尘（微粒）对人体健康的影响取决于烟尘（微粒）的浓度和其在空气中暴露的时间。研究数据表明，因上呼吸道感染、心脏病、支气管炎、气喘、肺炎、肺气肿等疾病到医院就诊人数的增加与大气中烟尘（微粒）浓度的增加是相关的。

烟尘（微粒）的粒径大小是危害人体健康的另一重要因素，它主要表现为：

（1）粒径越小，越不易沉积，长期漂浮在大气中容易被吸入体内，而且容易深入肺部。一般粒径在 $100\mu\text{m}$ 以上的微粒会很快在大气中沉降； $10\mu\text{m}$ 以上的微粒可以滞留在呼吸道中； $5\sim 10\mu\text{m}$ 的微粒大部分会在呼吸道沉积，被分泌的黏液吸附，可以随痰排出；小于 $5\mu\text{m}$ 的微粒能深入肺部； $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ 的微粒 50% 以上将沉积在肺腔中，引起各种尘肺病。

（2）微径越小，微粒比表面积越大，物理、化学活性越高，加剧了生理效应的发生和发展。此外，微粒的表面可以吸附空气中的各种有害气体及其他污染物，因而成为它们的载体，如可以承载强致癌物质苯并[a]芘及细菌等。

1.2.7 光化学烟雾及危害

光化学烟雾是排入大气的氮氧化物和碳氢化合物受太阳紫外线作用产生的一种具有刺激性的浅蓝色烟雾。它包含有臭氧（ O_3 ）、醛类、硝酸酯类（PAN）等多种复杂化合物，这些化合物都是光化学反应生成的二次污染物。当遇到低温或不利于扩散的气象条件时，烟雾会积聚不散，造成大气污染事件。这种污染事件最早出现在美国洛杉矶，所以又称洛杉矶光化学烟雾。近年来，光化学烟雾不仅在美国出现，而且在日本的东京、大阪、川崎市，澳大利亚的悉尼、意大利的热那亚和印度的孟买等许多工业化和汽车众多的城市先后出现过。

在光化学反应中，臭氧约占 85% 以上。日光辐射强度是形成光化学烟雾的重要条件，因此每年夏季是光化学烟雾的高发季节；在一天中，下午 2 时前后是光化学烟雾达到峰值的时刻。在汽车排气污染严重的城市中，大气中臭氧浓度的增高可视为光化学烟雾形成的信号。

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，引起眼睛红肿和喉炎，这可能与产生的醛类等二次污染物的刺激有关。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 $200\sim 1000\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时，会引起哮喘发作，导致上呼吸道疾病恶化，同时也刺激眼睛，使视觉敏感度和视力降低；浓度在 $400\sim 1600\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时，只要接触 2h 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；浓度再高时，

就会出现头痛，并使肺部气道变窄，出现肺气肿。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，如表 1-5 所示。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。所以，必须采取一系列综合性

表 1-5 不同浓度 O_3 对人体健康的影响

O_3 的浓度 (10^{-6})	对人体健康的影响
0.02	开始闻到臭味
0.2	1h 闻到臭味
0.2~0.5	3~6h 视力下降
1	1h 会引起气喘，2h 会引起头痛
5~10	全身痛，麻痹引起肺气肿
50	30min 即死亡