

高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材

电力环境保护

黄成群 潘丽梅 主编

DIANLI HUANJING BAOHU



高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材

电力环境保护

主 编	黄成群	潘丽梅		
副主编	李艳萍	罗 成	李亚军	
参 编	宋长华	杨 莹	梅其政	穆顺勇
主 审	周永言	洪锦从		

机械工业出版社

本书为高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材。

本书重点论述火电厂烟气脱硫、脱硝、除尘、脱碳和脱汞技术，火电厂废水处理和核电厂环境保护；亦涉及电力工业的其他环境保护问题，如水电厂环境保护、输变电环境保护、噪声污染与防护等。本书内容紧密联系生产实际，全面完整地描述了国内外电力系统环境保护的新技术、新方法和新理论。

本书可作为高职高专院校电力技术类专业的教材，也可作为相关企业岗位培训、职业资格鉴定的培训教材，还可供电力系统相关工程技术人员以及管理人员阅读和参考。

为方便教学，本书配有电子课件、模拟试卷等，凡选用本书作为授课用书的学校均可来电索取。咨询电话：01088379375；电子邮箱：wang-zongf@163.com。

图书在版编目(CIP)数据

电力环境保护/黄成群，潘丽梅主编. —北京：机械工业出版社，2012.2

高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材

ISBN 978-7-111-37029-1

I. ①电… II. ①黄…②潘… III. ①电力工程—环境保护—高等职业教育—教材 IV. ①X322

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第001541号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑：于宁 王宗锋 责任编辑：王宗锋 曲世海

版式设计：霍永明

封面设计：路恩中

责任印制：杨曦

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2012年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.75印张·360千字

0 001—3 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-37029-1

定价：28.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

电力工业是国民经济的基础工业，也是环境污染大户。我国电力工业的环境保护工作相对滞后，火电厂烟尘、 SO_2 、 NO_x 以及由此而产生的酸雨等对大气环境造成了极大的危害，核电厂核辐射、输电线路等可能产生的危害也逐渐受到人们的关注。我国电力结构以火力发电为主，火电装机容量以及发电量占70%以上。目前，我国电力工业（尤其是火电厂）的环保形势非常严峻，可以预料在今后一段时期内，电力系统的环保压力会越来越大，做好环保工作给电力系统带来的经济效益会越来越明显。

本书具有如下特点：①合理选择教材内容，有利于按需施教，因材施教；②力求实用为主、简明易懂，避免过深的原理，着力从技术应用角度介绍烟气除尘、脱硫及脱硝等；③注重推广使用国家及行业新标准；④在编写过程中力求汲取最新信息，将脱碳、脱汞等新知识、新技术、新工艺及时反映在书中；⑤介绍了一些现场应用实例。

本书由重庆电力高等专科学校黄成群、哈尔滨电力职业技术学院潘丽梅任主编，山东电力高等专科学校李艳萍和重庆电力高等专科学校罗成、李亚军任副主编，参加编写的还有重庆电力高等专科学校宋长华、哈尔滨电力职业技术学院杨莹、重庆电力高等专科学校梅其政和西安电力高等专科学校穆顺勇。本书共分九章，其中，绪论、第一章、第二章、第四章由黄成群编写；第五章由李艳萍编写；第三章、第七章、第八章由潘丽梅、杨莹编写；第六章、第九章由罗成、李亚军编写。此外，宋长华、梅其政和穆顺勇也参加了部分章节的编写。

本书由广东电网公司电力科学研究院周永言和台山核电合营有限公司洪锦从审稿，他们对本书进行了认真的审阅，提出了许多宝贵的意见和建议，在此对他们致以衷心的感谢。

本书在编写过程中，得到了有关院校老师和企业的支持与帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，加之时间仓促，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言		
绪论 电力环境保护概述	1	
第一节 电力与环境保护	1	
第二节 火电厂排放的大气污染物及管理措施	5	
复习思考题	14	
第一章 火电厂烟气脱硫技术	15	
第一节 火电厂脱硫技术概述	15	
第二节 湿式石灰石-石膏法脱硫工艺	17	
第三节 循环流化床脱硫技术	60	
第四节 其他烟气脱硫技术	70	
复习思考题	76	
第二章 火电厂烟气脱硝技术	77	
第一节 氮氧化物控制技术概述	77	
第二节 低氮氧化物燃烧技术	81	
第三节 选择性催化还原脱硝技术	84	
第四节 其他烟气脱硝技术	100	
复习思考题	105	
第三章 火电厂除尘技术	106	
第一节 除尘技术概述	106	
第二节 电除尘技术	111	
第三节 袋式除尘技术	118	
第四节 电袋复合除尘技术	123	
第五节 灰渣与综合利用	126	
复习思考题	134	
第四章 火电厂脱碳脱汞技术	135	
第一节 火电厂脱碳技术	135	
第二节 火电厂脱汞技术	148	
复习思考题	152	
第五章 火电厂废水处理	153	
第一节 火电厂废水类型及特性	153	
第二节 废水处理工艺及主要设备	157	
第三节 主要废水的处理及回用	168	
复习思考题	171	
第六章 核电厂环境保护	173	
第一节 放射性物质的来源与废物管理	173	
第二节 核电厂放射性废气的处理	181	
第三节 核电厂放射性废液的处理	184	
第四节 核电厂放射性固体废物的处理	189	
复习思考题	195	
第七章 水电厂环境保护	196	
第一节 水电厂对水环境的影响	196	
第二节 水电厂对生态环境的影响	199	
第三节 水库诱发地震及地震对水库的影响	206	
复习思考题	210	
第八章 输变电环境保护	211	
第一节 输变电环境问题及控制标准	211	
第二节 工频电场、磁场的强度与防护	214	
复习思考题	218	
第九章 噪声污染与防护	219	
第一节 噪声控制基础知识	219	
第二节 发电厂的噪声与防护	223	
第三节 输变电系统的噪声与防护	226	
复习思考题	228	
参考文献	229	

绪论 电力环境保护概述

第一节 电力与环境保护

一、几个基本概念

1. 环境

我们通常所说的环境，是相对于我们人类而言的，也就是指人类的生存环境。

人类环境分为自然环境和社会环境。

自然环境又称地理环境，是指环绕于人类周围的自然界。它包括大气、水、土壤、生物和各种矿物资源等。自然环境是人类赖以生存和发展的物质基础。

社会环境是指人类在自然环境的基础上，为不断提高物质和精神生活水平，通过长期有计划、有目的的发展，逐步创造和建立起来的人工环境，如城市、农村和工矿区等。

我国环境保护法中对环境的定义为：环境是指影响人类生存和发展的各种天然的和经过人工改造的自然因素的总体，包括大气、水、海洋、土地、矿藏、森林、草原、野生生物、自然遗迹、人文遗迹、自然保护区、风景名胜区、城市和乡村等。

在我们的物质生活越来越丰富、物质欲望越来越强烈的今天，不能忘记，对我们的生命至关重要的东西其实只有三种，那就是：干净的空气、清洁的淡水、肥沃且没有受到污染的土壤，它们是我们生存必须依赖的三要素，缺一不可。

2. 环境污染

环境污染是指人类直接或间接地向环境排放超过其自净能力的物质或能量，使环境的质量降低，对人类的生存与发展、生物正常生长和生态平衡造成不利影响的现象。能够引起环境污染的物质称为污染物，如有害气体二氧化硫，重金属铅、汞等。能量的介入也会使环境质量降低，如热污染、噪声污染及电磁辐射污染等。

环境污染既可由人类活动引起，如人类生产和生活活动排放的污染物对环境的污染，也可由自然的原因引起，如火山爆发释放的尘埃和有害气体对环境的污染。环境保护中所指的环境污染主要是指人类活动造成的污染。

环境污染的类型，按环境要素可分为大气污染、水体污染和土壤污染等；按污染物的形态可分为废气污染、废水污染、固体废物污染以及噪声污染、辐射污染等；按污染产生的来源可分为工业污染、农业污染、交通运输污染和生活污染等；按污染物的分布范围又可分为全球性污染、区域性污染和局部性污染等。

3. 环境保护

环境保护就是运用现代环境科学理论和方法、技术，采取行政的、法律的、经济的、科学技术的等多方面措施，合理开发利用自然资源，防止环境的污染和破坏，综合整治环境，保护人体健康，保持生态平衡，保障人类社会的持续发展。

环境保护内容主要有：

1) 防治由人类生产和生活活动引起的环境污染, 包括防治工业生产排放的“三废”(废水、废气、废渣)、粉尘、放射性物质以及产生的噪声、振动、恶臭和电磁微波辐射, 交通运输活动产生的有害气体、废液、噪声, 海上船舶运输排出的污染物, 工农业生产和人民生活使用的有毒有害化学品, 城镇生活排放的烟尘、污水和垃圾等造成的污染。

2) 防止由建设和开发活动引起的环境破坏, 包括防止由大型水利工程、铁路、公路干线、大型港口码头、机场和大型工业项目等工程建设对环境造成的污染和破坏; 农垦和围湖造田活动, 海上油田、海岸带和沼泽地的开发, 森林和矿产资源的开发对环境的破坏和影响; 新工业区、新城镇的设置和建设等对环境的破坏、污染和影响。

3) 保护有特殊价值的自然环境, 包括对珍稀物种及其生活环境、特殊的自然发展史遗迹、地质现象、地貌景观等提供有效的保护。

另外, 城乡规划、控制水土流失和沙漠化、植树造林、控制人口的增长和分布、合理配置生产力等, 也都属于环境保护的内容。

简单地说, 环境保护要做的事情就是: 保护空气、水和土壤的洁净。保护好了地球(即人类)环境三要素, 才有保护地球生物物种的基础, 也才有保护生物多样性的基础。

4. 电力环境保护

电力环境保护就是指发电(电力生产)、输电和配电各环节对环境影响的防护和治理。

电力作为一种二次能源, 是由煤炭、水力资源、核能资源等一次能源转换而来的。按一次能源的不同, 电力生产可分为火电、水电、核电、生物能、风电、太阳能、地热和海洋潮汐等。在电源结构方面, 我国今后相当长的时期内将继续维持火电为主的基本格局。截至2006年底, 火电、水电、核电的相对比例分别为77.8%、20.7%和1.5%, 风电、太阳能等新能源发电在电源构成中所占比例很小。

电力环境保护内容主要有: ①火电厂尤其是燃煤电厂污染物控制。②水电厂建设和运行期的生态保护。③核电厂放射性污染的控制。④输变电过程电场、磁场、电磁场的影响控制。⑤可再生能源环境保护问题等。

当前电力环境保护的重点是燃煤电厂的污染物控制, 而燃煤电厂大气污染问题尤其是其中的二氧化硫控制, 更是重点中的重点。

二、电力工业对环境的影响

1. 火力发电对环境的影响

火力发电一般利用煤炭、石油和天然气等燃料燃烧时产生的热能来加热水, 使水变成高温、高压水蒸气, 然后再由水蒸气推动汽轮机, 汽轮机驱动发电机发电。

我国一次能源消费结构长期以来以煤为主, 绝大多数火力发电厂是燃煤电厂。煤炭燃烧会产生多种类型的污染物, 因此燃煤电厂的环境污染问题最大。

(1) 废气 燃煤电厂要消耗大量煤炭, 而且燃烧的煤炭主要是原煤, 煤质以劣质煤为主。煤炭燃烧过程中会产生大量的烟尘和二氧化碳(CO_2)气体, 以及二氧化硫(SO_2)和氮氧化物等多种废气, 这将对大气造成严重的污染, 特别是排入大气中的二氧化硫和氮氧化物会形成酸雨, 酸雨对环境的影响极其严重。此外, 大量的二氧化碳排放还会导致全球气候变暖。

(2) 废水 火电厂在生产过程中还会消耗大量水资源, 加重了水资源的匮乏程度; 同时

还可能外排废水，对受纳水体造成一定程度的污染。

(3) 废渣 燃煤电厂会产生大量灰渣，如果不综合利用，大量的灰渣就需要存放处置，从而占用大量土地。

(4) 热污染 火电厂产生的大量废热对局部气候或受纳水体造成影响。

(5) 噪声 火电厂各类强噪声设备运行中的噪声对人员的听觉有一定程度的影响。

2. 水力发电对环境的影响

水利发电是利用水的势能，也就是水位的落差来做功，推动水轮机转动再带动发电机转动而发电。在我国常规能源资源中，水力资源仅次于煤炭，占有十分重要的地位。随着水电建设力度加大，水电的环境问题日益显现，社会关注程度也不断加大。尤其是流域梯级水电建设影响范围广、因素复杂、周期长，有些影响具有累积和滞后效应，甚至还有一些不可逆的影响，主要有以下几个方面：

(1) 自然方面 水库蓄水使地面沉降，库岸滑坡，淹没大片土地，并可诱发地震；库区蒸发量大，改变小气候；使下游水文条件改变，地下水位降低。

(2) 生物方面 大片生物区被淹，改变了上、下游的水陆环境，影响上、下游鱼类的迁移习性。

(3) 地球物理、化学方面 水的流动特性改变，使水流自净能力下降，从而改变了水的物理、化学性质（如颜色、气味、水温 and 溶氧量等）。

水电开发对环境的影响问题有的尚在讨论之中、但水电有无可争辩的优越性，其对环境的影响问题可在勘测、设计和施工阶段精心处理，使影响减至最小程度。

3. 核能发电对环境的影响

总体而言，核电是清洁、安全的能源，没有火电排放的烟尘、 SO_2 、氮氧化物和 CO_2 。核电站运营过程中对环境的影响主要是含放射性的气体、液体的排放和固体废物的贮存、处置，以及和火力发电厂相同的常规废水、热污染和噪声污染。正常运行时，核燃料裂变会产生大量放射性裂变产物，同时也会活化一些材料物质和杂质，产生大量的放射性活化产物。这样，反应堆内就会出现大量的放射性核素。虽然它们中的绝大部分被密封在燃料元件包壳和回路冷却系统中，但这首先将产生高放射性的乏燃料和堆芯构件，而且仍会有极少量的放射性物质在经过处理后通过烟囱排入大气，或与冷却水混合排入水体。此外，核电厂为了净化水、气系统中的放射性以及其他检修、运行活动直至最后的退役，也都将产生一定数量的中低或高放射性固体废物。核电厂在事故状态下可能会向环境中释放大量的放射性物质，对环境和公众健康产生危害。

核电站热能的 60% ~ 70% 以温排水的方式损失掉，温排水量比相同容量的火电厂要大。

4. 输变电对环境的影响

输电线路、变电所的建设期和运行期对环境的影响主要是：

1) 建设期造成的水土流失对环境的影响，以及地表变动、植被破坏对生态环境的影响。

2) 建设期引起的居民搬迁与安置问题。

3) 运行时产生的连续可听噪声、工频电场和磁场、无线电干扰对周围环境可能产生的影响。

其中最主要的是输电线路及变电所运行时产生的工频电场、无线电干扰和噪声对周围环境产生的影响。

三、电力环境保护现状和展望

1. 电力环境保护现状

我国政府非常重视环境保护工作，特别是改革开放以来，国家进一步强化了环保法制建设，制定了一系列有利于电力与环境保护协调发展的方针，确立了“预防为主，防治结合，综合治理”和“采用新技术，推行文明、清洁生产，减少有害物质排放，防治环境污染和其他公害”的政策，使电力得到迅速发展的同时环境保护取得明显成效。在 2005 年前，依靠科技进步，通过加强电力结构调整和合理布局电源，按照“以 SO_2 达标排放治理为核心，全面促进其他污染物治理和生态环境保护”的工作思路，电力环境保护的“老账”已基本还完，新建项目不欠“新账”，所有污染物基本达到国家排放标准。

目前，电力工业在环境保护方面取得的成绩主要有：脱硫环保产业初具规模（国产化 300 MW 以上湿法脱硫机组投入运行）；烟尘、 SO_2 和氮氧化物污染控制技术水平和能力明显提高；污染物排放绩效及清洁生产指标不断改善；灰渣、废水等污染控制和综合利用成效显著。

尽管电力环境保护取得了以上成绩，但与国家不断趋严的法规要求相比，与国外发达国家电力污染控制水平相比，与日益严峻的环境形势相比，与人民群众日益增长的对优良环境需求相比，电力环境保护还存在较大差距。电力环境保护当前面临的问题主要有：①由于认识、政策、技术和资金等方面的原因， SO_2 达标排放难度较大。②现有电除尘器或其他高效除尘器，因设备、管理等问题难以达到设计效率。③强化氮氧化物控制的问题仅排到议事日程。④部分电厂灰水中悬浮物和 pH 值难以达到排放标准要求，个别电厂氟化物等污染物超标。⑤部分灰场灰水渗透对地下水产生影响。⑥环保科研水平较低，特别是开发自主知识产权的、能用于商业化的环保新技术不多。⑦随着国家环保要求的不断拓宽和提高，对输变电项目工频电场和磁场影响的研究、评价及预防提出了新的要求。⑧水电建设的生态环境保护和移民问题对电力项目提出了新的规范性要求。⑨电力环境管理需进一步提高，特别是环境监测、统计、信息交流等基础工作需要强化。⑩国际环境问题压力不断增大，《京都议定书》已经生效，尽管没有规定我国温室气体的减排义务，但对我国能源工业将产生巨大而深远的影响。

2. 电力环境保护的发展趋势

（1）调整电源结构，加强电网建设 要大力开发水电，优化发展煤电，积极推进核电，适度发展天然气发电，鼓励新能源发电，坚持建设与节约并重，把节约放在优先位置，加强电力需求侧管理，提高资源利用效率。要加强电网建设，推进西电东送、南北互济、全国联网，实现更大范围的资源优化配置。重点开发西部水电基地和北部重点煤电基地，积极开展和大力推进交流 1000kV、直流正负 800kV 特高压电网示范工程的建设，以适应东西 2000 ~ 3000km，南北 800 ~ 2000km 远距离大容量电力输送需求，促进煤电就地转化和水电大规模开发，满足经济快速发展对电力的需求，保障全国能源安全供应。

（2）推行洁净煤发电技术 洁净煤发电技术可以把满足供电需要、提高效率和控制环境污染有机地结合起来。要把洁净煤发电技术作为关键技术，积极推进大型高效清洁的发电设备，如百万千瓦级核电机组、超超临界火电机组、燃气—蒸汽联合循环机组、整体煤气化联合循环机组（Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC）、大型循环流化床锅炉、大型水

电机组及抽水蓄能机组、大型空冷机组和大功率风力发电机组等在电力工业中的应用。

(3) 依靠科技进步,提高污染控制的技术水平 21 世纪是知识经济为主导地位的经济,对于环境保护,采用先进技术是最节约、最有效地解决环境污染的措施。要加大科技投入力度,组织技术攻关,对电力生产和建设过程中产生的污染和生态破坏等问题进行研究。

(4) 强化政策引导 进一步完善有关能源价格政策、环保与资源节约激励政策,以引导企业发展循环经济。如研究能源和电力价格政策,以促进节约资源和节约用电;研究和出台清洁电能的优质优价或优先发电的电价机制,促进企业加快污染治理;积极推进 SO_2 排放总量交易政策的实施,用市场机制实现低成本控制污染的目的。

(5) 加强行业自律,推进循环经济发展 行业协会应当在环境保护与资源节约工作中发挥行业管理和自律作用,如针对电力行业的特点,促进建立符合科学发展观的以绩效、能效评价指标为主的电力环保与资源节约评价体系,通过行业自律的作用促进实现节约型电力的发展。

(6) 加强环保国际合作 电力环保方面具有十分广阔的国际合作前景与市场,继续加大环保国际合作范围。通过技术交流、人员培训,引进适合中国国情的污染控制技术,提高污染控制水平,积极争取国际环保机构、外国政府和国际金融组织的优惠贷款和赠款,用于重点环保项目建设。

本书将重点介绍燃煤电厂大气污染的控制技术——脱硫、脱硝、除尘,较为详细地介绍水电、核电、输变电的环境保护,对发电、输电过程都涉及的废水、噪声污染则独立列章介绍。由于生物能、风电、太阳能、地热和海洋潮汐发电几乎不会产生污染物,本书不予介绍。

第二节 火电厂排放的大气污染物及管理措施

火电厂排放烟气中所含成分很多,主要有 N_2 、水蒸气、 CO_2 、 SO_2 、 SO_3 、 NO_x 、 CO 、颗粒物、重金属和微量元素(如 As、Hg、Ni、Mn)等。目前,我国和世界各国对火电厂排放烟气中污染物的控制集中于 SO_2 、 NO_x 和烟尘,发达国家已开始研究对重金属和 CO_2 的控制。

一、火电厂排放的大气污染物

(一) 烟尘

1. 烟尘的产生

燃煤电厂是将煤粉(通常粒径小于 $90\mu\text{m}$ 的占 80% 以上)随一次风送进燃烧室进行燃烧。煤粉颗粒小,受到火焰及炉壁来的辐射热后,在短时间内就能燃烧。但是,煤中含有部分不能燃烧的成分,其残留的固态物质即灰分,一般灰分产率为 20% ~ 40%。煤燃烧后形成的固体颗粒物粒径很小,一部分以大尺寸的炉渣形式排出;另一部分成为飞灰悬浮于烟气中,通过除尘装置而将其绝大部分加以收集,但仍有部分飞灰通过烟囱排往大气中,烟尘特指后者。锅炉烟尘排放量与燃煤量、灰分、燃烧方式、烟气流速、锅炉类型、运行参数、除尘效率等因素有关。

2. 烟尘的危害

大气中固体颗粒物包括粉尘（指悬浮于气体介质中的小固体粒子）和烟尘等，其最大粒径大于 $100\mu\text{m}$ ，最小粒径仅有 $10^{-3}\mu\text{m}$ 。其中粒径大于 $10\mu\text{m}$ 的降尘在重力的作用下，能迅速沉降至地面；而粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的飘尘（ PM_{10} ）能在空气中长期悬浮并做布朗运动，容易进入人的呼吸系统。由于飘尘几乎不能被上呼吸道表面体液截留并随痰排出，很容易直接进入肺部并在肺泡内沉积，因此对人体的危害最大，其危害程度取决于固体颗粒物的粒径、种类、溶解度以及吸附的有害气体的性质等。

侵入肺部没有被溶解的沉积物会被细胞所吸收，损伤并破坏细胞，最终侵入肺组织而引起尘肺，如吸入煤灰形成的煤肺，吸入金属粉尘形成的铁肺、铝肺等。如果沉积物被溶解，则会侵入血液，并送至全身，造成血液系统中毒。例如妨碍血红蛋白生成的铅烟尘可以引起急性中毒或慢性中毒，其症状是精神迟钝、大脑麻痹、癫痫，甚至死亡。

燃烧和金属冶炼过程，以及汽车排气产生的烟尘具有很复杂的化学组成，其中有镍、镉、铬、铍、钒、铅、砷等有毒物质，特别是致癌物质苯并（a）芘、苯并蒽等，通过呼吸道或皮肤进入人体，会引起肺癌或皮肤癌。

（二）硫氧化物和氮氧化物

1. 硫氧化物

（1）煤中硫的燃烧产物 煤炭中含有少量含硫的物质，按照硫在煤中的存在形态分为无机硫和有机硫，无机硫包括元素硫、硫化物硫（也称硫铁矿硫，以黄铁矿为主，化学式为 FeS_2 ）和硫酸盐硫。

元素硫、硫化物硫和有机硫为可燃性硫（为 80% ~ 90%）。硫酸盐硫不参与燃烧反应，多残存于灰烬中，称为非可燃性硫。煤中可燃性硫在锅炉中燃烧时主要生成 SO_2 ，还有少量 SO_3 ，其浓度相当于烟气中 SO_2 浓度的 1% ~ 2%。硫转化成 SO_2 的比率随硫在煤中的存在形态、燃烧设备及运行工况不同而不同。

（2）二氧化硫的危害 电力生产中 SO_2 的危害主要表现在两个方面：一是对锅炉设备的腐蚀；二是对环境的危害。

SO_2 和 SO_3 易与烟气中的水蒸气形成 H_2SO_3 和 H_2SO_4 ，会在温度低于其露点的金属表面上凝结，造成低温受热面的酸腐蚀。煤中硫含量越高，露点越高，越易在较高温度受热面处凝结，危害也越大。当煤中硫含量较高时，为减轻腐蚀，必须提高排烟温度，否则会有明显的堵灰和腐蚀，对锅炉危害很大。

SO_2 是造成环境污染的根源之一，是目前大气污染物中含量较大、影响面较广的一种气态污染物。大气中 SO_2 的来源很广，几乎所有的工矿企业都可能产生。在排放 SO_2 的各种过程中，约 90% 来自燃料燃烧过程，其中火电厂排放量最大。

SO_2 为无色、有强烈刺激气味的气体，对人体呼吸器官有很强的毒害作用，还可通过皮肤经毛孔侵入人体，或通过食物和饮水经消化道进入人体而造成危害。人体主要经呼吸道吸收大气中的 SO_2 ，会引起不同程度的呼吸道及眼睛黏膜的刺激症状。 SO_2 常常跟大气中的飘尘结合在一起被吸入，飘尘气溶胶微粒可把 SO_2 带到肺部使毒性增加 3 ~ 4 倍。如果 SO_2 遇到水蒸气，形成硫酸雾，就可以长期滞留在大气中，毒性比 SO_2 大 10 倍左右，同时对金属及农作物有着严重的腐蚀与伤害作用。“八大公害事件”中的伦敦烟雾事件就是硫酸烟雾引起的呼吸道疾病，导致 5 天之内 4000 人死亡，后来又连续发生了 3 次。

大气中 SO_2 还是形成酸雨的主要污染物。

2. 氮氧化物

(1) 煤燃烧形成的氮氧化物 氮和氧结合的化合物有 NO 、 NO_2 、 N_2O 、 N_2O_3 、 N_2O_4 、 N_2O_5 等, 总起来用氮氧化物 (NO_x) 表示, 其中造成大气污染的 NO_x 主要指的是 NO 、 NO_2 和 N_2O 。 NO_x 在煤、石油、天然气等燃料燃烧过程中产生的数量最多, 在所有燃料燃烧排放的 NO_x 中, 约 70% 来自于煤炭的直接燃烧。

煤中氮的含量和氮化合物的存在形式因煤的种类不同而相差很大, 不同产地同类型的煤中含氮量也有很大差异。一般来说, 煤中的氮含量在 0.3% ~ 3.5% 之间, 煤中氮均为有机氮。煤中氮的化学结合形式不同, 其在燃烧时分解特性也不同, 直接决定了 NO_x 的氧化 - 还原反应过程和最终的 NO_x 生成量。

在煤燃烧过程中氮氧化物的生成量和排放量与煤燃烧方式, 特别是燃烧温度和过量空气系数等燃烧条件关系密切。在通常的燃烧温度下, 煤粉炉排出的烟气中 NO 占 90% 以上, NO_2 占 5% ~ 10%, 而 N_2O 只占 1% 左右。在锅炉炉膛中心形成的 NO , 不能与烟气中的氧进一步反应生成 NO_2 。进入大气后, NO 最终会氧化成 NO_2 , 各国均以 NO_2 为衡量污染的标准。

(2) 氮氧化物的危害 NO_x 对人体的危害作用是对呼吸道的损害。 NO_2 比 NO 的毒性高 4 倍, 可引起肺损害, 甚至造成肺水肿。慢性中毒可致气管、肺病变。吸入 NO 可引起变性血红蛋白的形成, 并对中枢神经系统产生影响。

吸附 NO_x 的悬浮尘粒最易随着人的呼吸进入肺部, 对肺有直接损伤作用。 N_2O 温室作用是 CO_2 的 310 倍, 是重要的温室气体。当 NO_x 排入大气后, NO_x 与碳氢化合物一起还可能形成光化学烟雾。

作为酸性气体, NO_x 和 SO_2 都是形成酸雨的主要污染物。

3. 酸雨的危害

目前, 三个备受关注的全球性大气环境问题——温室效应、酸雨和臭氧层破坏, 均与燃烧矿物燃料有关, 其中酸雨问题最为严重。酸雨是当前对环境最为严重的威胁, 对生态系统的破坏力很大。 SO_2 和 NO_x 是形成酸雨的最重要的物质, 正常情况下, 大气中因含 CO_2 等酸性气体, 降水显微酸性, 但如果还有其他的酸性物质存在, 就会使降水的 pH 值降低。所谓酸雨, 通常指 pH 值低于 5.6 的降水。酸雨对水生生态系统、农林生态系统、建筑物和材料以及人体健康等方面均有危害, 目前我国每年因酸雨和 SO_2 污染对生态环境损害和人体健康影响造成的经济损失在 1100 亿元左右。

(三) 二氧化碳

烟气中的 CO_2 是燃料完全燃烧的产物。我国目前是 CO_2 排放第二大国, 2004 年占世界 CO_2 排放总量的 17.8%, 仅次于美国。燃煤电厂是 CO_2 的集中排放源, 其 CO_2 排放量约占总排放的 1/3。由于我国尚处于工业化阶段, 经济发展迅速, 能源消耗保持较快增长, 并且我国的主要一次能源——煤是高含碳量的化石燃料, 因此我国的 CO_2 排放增长迅速。

CO_2 微具酸味, 无毒, 但浓度高时能造成缺氧窒息。 CO_2 的排放会给环境带来危害, 产生温室效应。而所有温室效应气体中, CO_2 对温室效应的贡献占 60%。 CO_2 的大量排放加剧了温室效应, 导致在过去的 100 年中全球平均地面温度上升 0.3 ~ 0.6℃, 气候异常。全球变暖将引起雪山融化, 南极冰川减少, 大洋海平面上升等。人类如果对 CO_2 排放不采取有效的控制措施, 到 2050 年海平面就会升高 30 ~ 50cm, 直接威胁沿海国家以及 30 多个海岛

国家的生存与发展。另外，海平面升高导致海水不断侵入火山岩，会引起山体滑坡，岩石张力受到破坏。全球有 90% 的火山分布于大洋周围，这样会在山体承受不了内部炽热熔岩的情况下导致熔岩喷发，对地球环境带来难以预测的重大破坏。

（四）微量元素的污染

1. 煤中的微量元素

煤中微量元素多达 80 余种，燃烧后分布于烟气及灰渣中。对环境影响较大的微量元素主要有氟、砷、铅、银、汞、铬等。在煤燃烧过程中，有的主要以气体状态随烟气排到大气中，如氟、汞等易挥发元素；有的则主要富集于飞灰中，如铅、镉、铬等。

2. 汞的污染

汞是煤中最易挥发的有毒重金属元素。大气中的汞可以通过呼吸作用随气体进入人体，也可以沿食物链通过消化系统被人体吸收，它对人类及生物环境的危害极大。大气中汞的来源包括自然源和人为源，经初步估算，人为源的汞排放占 50% ~ 75%，主要包括矿石燃料的燃烧、汞矿和其他金属的冶炼、氯碱工业和电器工业中使用汞等，其中份额最大的来源于燃烧。近期全球人为源汞排放清单的计算表明，亚洲是全球人为向大气排汞最多的地区，每年向大气排放汞超过 1000t，占全球排放总量的 50% 以上。目前，我国人为活动排汞清单的研究工作还很欠缺，初步估算认为，人为源的大气汞年排放量为 500 ~ 700t，我国已被认为是全球大气汞排放最多的国家之一，造成汞排放较多的主要原因是我国对能源的较大需求及较为落后的污染排放控制能力。

汞对人体的危害程度与汞的化学形态有关。不同形态的汞对人体的毒性从大到小依次为：有机汞化合物 > 无机汞化合物 > 单质汞。通过食物或饮水摄入微量单质汞一般不会引起中毒，但是大量的摄入单质汞蒸气会引起急性中毒，可能导致肝炎、肾炎、尿血或尿毒症等。单质汞还可能在人体器官中转化为离子态，从而在肾中富集，还有可能损伤脑组织，引起慢性中毒，表现为头痛、四肢麻木等神经性症状。无机汞化合物在水中溶解度较高，主要通过胃肠道吸收，主要损害消化道和肾脏。毒性最高、危害最大的是有机汞化合物，尤其是甲基汞。甲基汞进入人体后容易被吸收并输送到全身各器官，特别是肝、肾和脑组织。脑组织受损害先于其他各组织，主要损害部位为大脑皮层、小脑和末梢神经，其中毒症状主要有头痛、疲乏、健忘和精神异常等，还有其他特殊症状，如口周围和肢端麻木、感觉障碍、语言障碍、步态不稳、视野缩小、听力障碍，以及肌肉萎缩、肌痉挛等。甲基汞还会透过胎盘从母体转移给胎儿。因胎盘转移使胎儿产生严重的胎儿性甲基汞中毒的事例在日本已有多起报道，生下来的婴儿多数智力低下。

二、火电厂大气污染物排放管理措施

火电厂的大气污染物排放与环境保护之间的矛盾，已成为影响电力工业可持续发展乃至国家总体能源战略的制约因素。因此，加强对我国火电行业大气污染物排放的控制，走新型工业化道路，对火电厂实施技术改造和管理手段的改进，减少大气污染物排放量是实现电力工业和整个国民经济可持续发展的必然之路。

（一）我国火电企业现行的环境保护管理制度

自 20 世纪 70 年代以来，我国已逐步形成具有中国特色的环境保护管理制度，其中与电力工业相关的主要包括：环境影响评价制度、“三同时”制度、排污收费制度、污染物总量

控制制度、排污权申报与排污许可证制度、限期治理污染制度和实行关停并转制度等。这些制度可以归纳为三个层次：

第一层次，“三同时”制度（指对于新建、扩建、改建的电力建设项目中的环境保护设施必须与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用的制度）以及环境影响评价制度是针对电力行业新增项目。限制新污染源进入，体现了“预防为主”的原则，是电力行业的前期环境管理制度。

第二层次，排污收费制度、污染物总量控制制度、排污权申报与排污许可证制度（简称许可证制度）是针对电力企业发电过程的环境管理制度。随着我国经济的发展，用电量日益加大，单纯依靠前期管理是远远不够的，所以过程环境管理制度是控制火电排放污染物的关键之一。

第三层次，限期治理污染制度和实行关停并转制度是以“限期治理”为原则，实施环境质量目标的控制政策，是后期环境管理制度，经过前两个环境制度仍不符合环境质量的电力企业将被淘汰出局。

（二）建立“两控区”，重点对火电机组的二氧化硫排放实施控制

为进一步遏制酸雨和 SO_2 污染的发展，1995 年 8 月，全国人大常委会通过了修订的《中华人民共和国大气污染防治法》，规定在全国划定酸雨控制区和 SO_2 污染控制区（以下简称“两控区”），在“两控区”内强化对酸雨和 SO_2 污染控制。原国家环境保护局于 1995 年底组织开展了“两控区”划分工作。2002 年 9 月 19 日，经国务院正式批准，原国家环境保护总局、原国家发展计划委员会、原国家经贸委、财政部于 2002 年 10 月 3 日联合发布了《两控区酸雨和二氧化硫污染防治“十五”计划》。

《两控区酸雨和二氧化硫污染防治“十五”计划》中对火电厂制定了更为严格的减排方案，除以热定电的热电厂外，禁止在大中城市城区及近郊区新建燃煤火电厂。新建、改造燃煤含硫量大于 1% 的电厂，必须建设脱硫设施。现有燃煤含硫量大于 1% 的电厂，在 2010 年前分期分批建成脱硫设施或采取其他具有相应效果的减排 SO_2 的措施。

（三）与时俱进修订标准且提高火电机组大气污染物排放的控制水平

1. 《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2003）

2003 年底，我国颁布了《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2003），该标准根据我国的环境状况、经济状况、电力技术发展水平，在 1996 年颁布的标准的基础上进行了修订。GB 13223—2003 关于 SO_2 和氮氧化物的排放限值见表 0-1 和表 0-2，火力发电锅炉烟尘最高允许排放浓度和烟气黑度限值见表 0-3。该标准分三个时段，对不同时期的火电厂建设项目分别规定了排放控制要求。

1996 年 12 月 31 日前建成投产或通过建设项目环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目，执行第 1 时段排放控制要求。

1997 年 1 月 1 日起至本标准实施前通过建设项目环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目，执行第 2 时段排放控制要求。

自 2004 年 1 月 1 日起，通过建设项目环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目（含在第 2 时段中通过环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目，自批准之日起满 5 年，在本标准实施前尚未开工建设的火电厂建设项目），执行第 3 时段排放控制要求。

表 0-1 火力发电锅炉 SO₂ 最高允许排放浓度 (单位: mg/m³)

时 段	第 1 时段		第 2 时段		第 3 时段
实施时间	2005 年 1 月 1 日	2010 年 1 月 1 日	2005 年 1 月 1 日	2010 年 1 月 1 日	2004 年 1 月 1 日
燃煤锅炉及燃油锅炉	2100 ^①	1200 ^①	2100 1200 ^②	400 1200 ^②	400 800 ^③ 1200 ^④

- ① 该限值为全厂第 1 时段火力发电锅炉平均值。
- ② 在本标准实施前, 环境影响报告书已批复的脱硫机组, 以及位于西部非两控区的燃用特低硫煤 (入炉燃煤收到基硫分小于 0.5%) 的坑口电厂锅炉执行该限值。
- ③ 以煤矸石等为主要燃料 (入炉燃料收到基低位发热量小于等于 12550kJ/kg) 的资源综合利用火力发电锅炉执行该限值。
- ④ 位于西部非两控区的燃用特低硫煤 (入炉燃煤收到基硫分小于 0.5%) 的坑口电厂锅炉执行该限值。

表 0-2 火力发电锅炉及燃气轮机组氮氧化物最高允许排放浓度 (单位: mg/m³)

时 段		第 1 时段	第 2 时段	第 3 时段
实施时间		2005 年 1 月 1 日	2005 年 1 月 1 日	2004 年 1 月 1 日
燃煤锅炉	$V_{daf} < 10\%$	1500	1300	1100
	$10\% \leq V_{daf} \leq 20\%$	1100	650	650
	$V_{daf} > 20\%$			450
燃油锅炉		650	400	200
燃气轮机组	燃油			150
	燃气			80

注: 表中 V_{daf} 为干燥无灰基挥发分, 以假想无水、无灰状态的煤为基准, 将煤样在规定条件下隔绝空气加热, 并进行水分和灰分校正后的质量损失。

表 0-3 火力发电锅炉烟尘最高允许排放浓度和烟气黑度限值

时段	烟尘最高允许排放浓度 / (mg/m ³)					烟气黑度 (林格曼黑度/级)
	第 1 时段		第 2 时段		第 3 时段	
实施时间	2005 年 1 月 1 日	2010 年 1 月 1 日	2005 年 1 月 1 日	2010 年 1 月 1 日	2004 年 1 月 1 日	2004 年 1 月 1 日
燃煤锅炉	300 ^① 600 ^②	200	200 ^① 500 ^②	50 100 ^③ 200 ^④	50 100 ^③ 200 ^④	1.0
燃油锅炉	200	100	100	50	50	

- ① 县级及县级以上城市建成区及规划区内的火力发电锅炉执行该限值。
- ② 县级及县级以上城市建成区及规划区以外的火力发电锅炉执行该限值。
- ③ 在本标准实施前, 环境影响报告书已批复的脱硫机组, 以及位于西部非两控区的燃用特低硫煤 (入炉燃煤收到基硫分小于 0.5%) 的坑口电厂锅炉执行该限值。
- ④ 以煤矸石等为主要燃料 (入炉燃料收到基低位发热量小于等于 12550kJ/kg) 的资源综合利用火力发电锅炉执行该限值。

2. 《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)

目前，环境保护部已颁布实施《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2011）。新标准修订的主要内容有：①调整了大气污染物排放浓度限值。②规定了现有火力发电锅炉达到更加严格的排放浓度限值的时限。③取消了全厂二氧化硫最高允许排放速率的规定。④增设了燃气锅炉大气污染物排放浓度限值。⑤增设了大气污染物特别排放限值。⑥增设汞及其化合物排放限值。

GB 13223—2011 污染物排放控制主要要求有：①自 2014 年 7 月 1 日起，现有火力发电锅炉及燃气轮机组执行表 0-4 规定的烟尘、二氧化硫、氮氧化物和烟气黑度排放限值。②自 2012 年 1 月 1 日起，新建火力发电锅炉及燃气轮机组执行表 0-4 规定的烟尘、二氧化硫、氮氧化物和烟气黑度排放限值。③自 2015 年 1 月 1 日起，燃烧锅炉执行表 0-4 规定的汞及其化合物污染物排放限值。④重点地区的火力发电锅炉及燃气轮机组执行表 0-5 规定的大气污染物特别排放限值，执行大气污染物特别排放限值的具体地域范围、实施时间，由国务院环境保护行政主管部门规定。

表 0-4 火力发电锅炉及燃气轮机组大气污染物排放浓度限值

（单位：mg/m³）（烟气黑度除外）

序号	燃料和热能 转化设施类型	污染物项目	适用条件	限值	污染物排放 监控位置
1	燃煤锅炉	烟尘	全部	30	烟囱或烟道
		二氧化硫	新建锅炉	100 200 ^①	
			现有锅炉	200 400 ^①	
		氮氧化物 （以 NO ₂ 计）	全部	100 200 ^②	
		汞及其化合物	全部	0.03	
2	以油为燃料的 锅炉或燃气轮机 组	烟尘	全部	30	
		二氧化硫	新建锅炉及燃气轮机组	100	
			现有锅炉及燃气轮机组	200	
		氮氧化物 （以 NO ₂ 计）	新建燃油锅炉	100	
			现有燃油锅炉	200	
			燃气轮机组	120	
3	以气体为燃料 的锅炉或燃气轮 机组	烟尘	天然气锅炉及燃气轮机组	5	
			其他气体燃料锅炉及燃气轮机组	10	
		二氧化硫	天然气锅炉及燃气轮机组	35	
			其他气体燃料锅炉及燃气轮机组	100	
		氮氧化物 （以 NO ₂ 计）	天然气锅炉	100	
			其他气体燃料锅炉	200	
			天然气燃气轮机组	50	
			其他气体燃料燃气轮机组	120	

(续)

序号	燃料和热能 转化设施类型	污染物项目	适用条件	限值	污染物排放 监控位置
4	燃煤锅炉，以 油、气体为燃料 的锅炉或燃气轮 机组	烟气黑度（林 格曼黑度/级）	全部	1	烟囱排放口

- ① 位于广西壮族自治区、重庆市、四川省和贵州省的火力发电锅炉执行该限值。
- ② 采用 W 型火焰炉膛的火力发电锅炉，现有循环流化床火力发电锅炉，以及 2003 年 12 月 31 日前建成投产或通过
建设项目环境影响报告书审批的火力发电锅炉执行该限值。

表 0-5 大气污染物特别排放限值

(单位：mg/m³) (烟气黑度除外)

序号	燃料和热能 转化设施类型	污染物项目	适用条件	限值	污染物排放 监控位置
1	燃煤锅炉	烟尘	全部	20	烟囱或烟道
		二氧化硫	全部	50	
		氮氧化物（以 NO ₂ 计）	全部	100	
		汞及其化合物	全部	0.03	
2	以油为燃料的锅炉或燃气轮 机组	烟尘	全部	20	
		二氧化硫	全部	50	
		氮氧化物（以 NO ₂ 计）	燃油锅炉	100	
			燃气轮机组	120	
3	以气体为燃料的锅炉或燃气 轮机组	烟尘	全部	5	
		二氧化硫	全部	35	
		氮氧化物（以 NO ₂ 计）	燃气锅炉	100	
			燃气轮机组	50	
4	燃煤锅炉，以油、气体为燃 料的锅炉或燃气轮机组	烟气黑度（林格曼黑度/级）	全部	1	烟囱排放口

显然，新标准与 2003 年的旧标准相比，在总体上收紧了污染物排放限值，提高了新建机组和现有机组排放控制要求。

(四) 汞减排管理措施

汞是唯一主要以气相形式存在于大气中的重金属元素。在过去的 100 年中，约 20 万 t 的汞被释放到大气中，目前仍有 3500t 左右的汞滞留在大气中。和工业革命前相比，工业革命后人为活动使汞释放强度不断增加，已经导致大气汞浓度显著升高，目前全球大气中汞的含量水平较工业革命前平均增加了 3 倍左右。20 世纪 80 年代后期，人们在没有人污染源的北美和北欧偏远地区湖泊鱼体中陆续发现了汞含量超标的现象，而大气汞经长距离传输后在这些地区沉降是造成汞污染的主要原因。至此，这种全新的汞污染模式引起了全球科学家的普遍关注，而汞作为一种全球性污染物的概念也正式被提出。由此，在西方发达国家兴起了环境汞污染的研究热潮。在瑞典哥德堡大学无机化学系 Oliver Lindqvist 教授的倡议下，于