

► 国家环境技术管理项目案例汇编丛书 ◀

工业烟气(脱硫、脱硝、除尘)

污染防治可行技术
案例汇编

高翔 等 编著

GONGYE YANQI TUOLIU TUOXIAO CHUCHEN
WURAN FANGZHI KEXING JISHU
ANLI HUIBIAN

中国环境出版社

▶ 国家环境技术管理项目 5

工业烟气(脱硫、脱硝、除尘) 污染防治可行技术 案例汇编

高翔 等 编著

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

工业烟气 (脱硫、脱硝、除尘) 污染防治可行技术案例汇编 / 高翔等编著. — 北京: 中国环境出版社, 2015.2

(国家环境技术管理项目案例汇编丛书)

ISBN 978-7-5111-2208-7

I. ①工… II. ①高… III. ①工业废气—工业污染防治—案例—中国 IV. ①X701

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 010630 号

出版人 王新程
责任编辑 丁莞歆
责任校对 尹芳
装帧设计 岳帅

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街16号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67175507 (科技标准图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2016年1月第1版
印 次 2016年1月第1次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 10
字 数 200千字
定 价 40.00元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换。

《国家环境技术管理项目案例汇编丛书》 编写委员会

顾 问：吴晓青

主 任：刘志全

副主任：胥树凡

委 员：王泽林 吕 奔 冷 飞 李 磊 刘方正 蒋进元 何连生 姜 萍

《工业烟气（脱硫、脱硝、除尘）污染防治可行技术 案例汇编》编写委员会

主 编：高 翔

编 委：易 斌 燕中凯 张 凡 朱廷钰 郑成航 许丹宇 郭 俊 杨天学

岳 涛 胡达清 张涌新 崔 盈 徐 甸 李一葳 王宏亮 周志颖

王文君 郭可昕 党秋玲 齐瑞江



前言

我国快速工业化、城镇化的过程中，高耗能、高排放、重污染、产能过剩、布局不合理、能源消耗过大和以煤为主的能源结构持续强化，是导致我国当前大范围大气重污染频发的重要原因。以 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 为特征的区域性复合型污染日益突出，污染形势非常严峻。近年来，围绕切实改善大气环境质量的目标，国家和地方组织开展了大量的科技攻关，在大气污染防治尤其是脱硫、脱硝、除尘及主要烟气污染物超低排放控制方面进行了大量科学研究，同时形成了一批典型的应用案例，有力地支撑和引领了大气污染治理工作。

为了贯彻落实国家“十二五”规划，更好地发挥科技工作对国民经济和社会发展的引领和支撑作用，把环境科技成果迅速转化为污染防治的现实能力，提高环保投资效益、促进环境和经济协调发展，国家环境保护燃煤大气污染控制工程技术中心（浙江大学）、中国环境科学研究院、中国环境科学学会、中国环境保护产业协会和北京市劳动保护科学研究所共同承担了国家环境技术管理项目——“工业烟气（脱硫、脱硝、除尘）污染防治可行技术案例汇编”（项目编号 2011-30）。在环境保护部科技标准司的支持和指导下，项目组向社会广泛征集符合国家相关政策、标准的工业烟气（脱硫、脱硝、除尘）污染防治技术案例。截至 2013 年 12 月，共征集到全国 656 项工业烟气污染防治领域案例，其中脱硫案例 240 项、脱硝案例 75 项、除尘案例 341 项。案例范围涉及火电、钢铁及水泥等多个重点污染行业。在案例评选过程中，我们特别邀请了行业知名专家对案例在先进性、运行可靠性、经济性三

个方面进行了评审，共筛选出了 13 项典型工业烟气污染防治可行技术及相应的 46 项代表性案例成果汇编成册，其中脱硫案例 16 项、脱硝案例 13 项、除尘案例 17 项。为顺应更加严格的污染物排放要求，在前期大量工作的基础上，本书新增超低排放篇，选取典型案例 4 项。

本书详细地介绍了一批应用于当前我国工业烟气污染防治行业的可行技术，并通过鲜活的案例全面展示了各项技术的适用范围、基本原理、工艺流程、技术指标、效益分析等信息。

本书是在各个单位报送的案例的基础上经审核、编撰完成的，但未对所有技术的经济指标和实际运行情况进行现场核实。

在本书出版之际，我们对提交案例的管理工作者和科技工作者的参与表示衷心的感谢！对百忙之中参与案例评审的专家和给予此项工作支持的单位表示衷心的感谢！

编者

2015 年 12 月



目 录

1 工业烟气污染物排放及控制标准现状 /1

1.1 污染物排放现状 /1

1.1.1 二氧化硫排放情况 /3

1.1.2 氮氧化物排放情况 /4

1.1.3 烟尘及工业粉尘排放情况 /5

1.2 工业烟气污染物排放控制标准 /7

1.2.1 火电厂大气污染物排放标准 /7

1.2.2 水泥工业大气污染物排放标准 /9

1.2.3 钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准 /11

1.2.4 工业锅炉大气污染物排放标准 /11

2 脱硫篇 /13

2.1 脱硫技术发展概况 /13

2.2 脱硫技术应用现状 /13

2.2.1 燃煤电厂脱硫现状 /13

2.2.2 钢铁行业脱硫现状 /14

2.3 脱硫关键运行与维护规程 /15

2.3.1 石灰石 / 石灰 - 石膏湿法脱硫关键运行与维护规程 /15

- 2.3.2 循环流化床干法 / 半干法脱硫关键运行与维护规程 /18
- 2.4 脱硫可行技术案例 /20
 - 2.4.1 石灰石 / 石灰 - 石膏湿法脱硫技术 /20
 - 2.4.2 氨法烟气脱硫技术 /35
 - 2.4.3 海水烟气脱硫技术 /43
 - 2.4.4 镁法烟气脱硫技术 /47
 - 2.4.5 循环流化床干法 / 半干法烟气脱硫技术 /50

3 脱硝篇 /66

- 3.1 脱硝技术发展概况 /66
- 3.2 脱硝技术应用现状 /66
 - 3.2.1 燃煤电厂脱硝现状 /66
 - 3.2.2 水泥行业脱硝现状 /67
- 3.3 脱硝关键运行与维护规程 /67
 - 3.3.1 SCR 脱硝关键运行与维护规程 /67
 - 3.3.2 SNCR 脱硝关键运行与维护规程 /70
- 3.4 脱硝可行技术案例 /73
 - 3.4.1 选择性催化还原 (SCR) 脱硝技术 /73
 - 3.4.2 选择性非催化还原法 (SNCR) 脱硝技术 /88
 - 3.4.3 臭氧氧化脱硝技术 /98

4 除尘篇 /101

- 4.1 除尘技术发展概况 /101
- 4.2 除尘技术应用现状 /101
 - 4.2.1 燃煤电厂除尘器应用现状 /101

- 4.2.2 钢铁行业除尘器应用现状 /102
- 4.2.3 水泥行业除尘器应用现状 /102
- 4.3 除尘关键运行与维护规程 /103
 - 4.3.1 湿式静电除尘器启动前的检查与准备 /103
 - 4.3.2 湿式静电除尘器启动操作 /103
 - 4.3.3 湿式静电除尘器运行中的调整与维护 /103
 - 4.3.4 湿式静电除尘器停运 /104
 - 4.3.5 湿式静电除尘器停运后的检查与保养 /104
- 4.4 除尘可行技术案例 /105
 - 4.4.1 移动电极静电除尘技术 /105
 - 4.4.2 余热利用高效低低温电除尘技术 /109
 - 4.4.3 湿式静电除尘技术 /113
 - 4.4.4 袋式除尘技术 /120
 - 4.4.5 电袋复合除尘技术 /132
- 5 超低排放篇 /144
 - 5.1 超低排放技术发展概况 /144
 - 5.2 超低排放技术应用现状 /145

1 工业烟气污染物排放及控制标准现状

1.1 污染物排放现状

高浓度细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）是造成近年来我国频繁发生大面积区域性重污染灰霾天气的主要因素，对人们的身体健康和生活环境造成严重影响，受到来自公众、舆论和中央等各个层面的迫切关注。2013年1月的重污染天气是我国在实施新的《环境空气质量标准（GB 3095—2012）》及评价方法后经历的首次严重污染过程，对我国城市空气质量达标和大气污染防治工作提出了严峻的挑战，也为以往以牺牲环境为代价的经济发展模式敲响了警钟。如不迅速采取果断和高效的措施，历史上发生在发达国家的大气污染公害事件有可能在我国重演。 $PM_{2.5}$ 及其前体物如二氧化硫（ SO_2 ）、氮氧化物（ NO_x ）等的减排形势已十分严峻，亟须加强防控力度。火电、冶金、建材、石化等重点工业源生产过程是主要燃煤大户，也是 $PM_{2.5}$ 及其前体物最主要的来源之一。

图1-1和图1-2分别给出了1995—2012年中国一次能源消费结构及2012年世界和中国一次能源消费结构的比较。据统计，2012年中国煤炭消费约35.2亿t（约占全球的50.2%）；煤炭净进口2.89亿t，对外依存度为7.6%。2012年电力行业耗煤总量约18.55亿t。中国原油产量2.07亿t，进口原油2.71亿t，对外依存度为56.4%（超警戒线-50%）。2012年中国天然气产量1077亿 m^3 ，进口425亿 m^3 ，对外依存度为28.9%。我国以煤为主的能源消费结构是造成当前严重大气复合污染的重要原因。



图 1-1 中国一次能源消费结构（1995—2012）

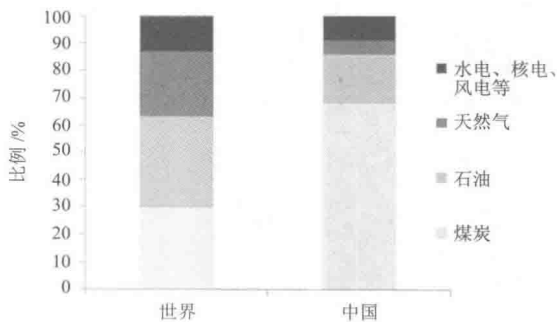


图 1-2 2012年世界和中国一次能源消费结构

我国单位 GDP 能耗强度和单位国土面积能耗强度的分布情况如图 1-3 和图 1-4 所示。2012 年单位 GDP 能耗强度平均约为 0.76t 标准煤 / 万元，单位土地面积能耗强度平均约为 376.80 t 标准煤 / km²。

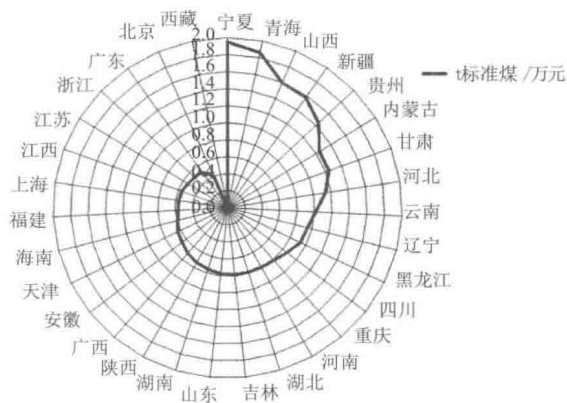


图 1-3 2012 年单位 GDP 能耗强度

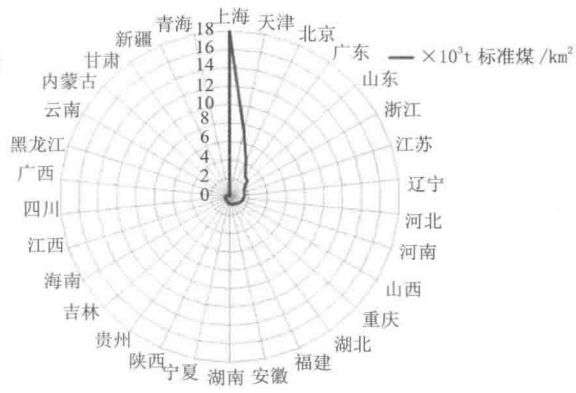


图 1-4 2012 年单位土地面积能耗强度

近年来，国家十分重视节能减排工作，相继出台了《“十二五”节能减排综合性工作方案》、《大气污染防治十条措施》等一系列政策，强力推动我国大气污染治理工作，有效遏制了大气污染的急剧恶化趋势。2012 年全国废气中二氧化硫、氮氧化物和烟（粉）尘排放总量分别为 2 117.6 万 t、2 337.8 万 t 和 1 234.3 万 t，与 2011 年相比分别下降了 4.52%、2.77%、3.48%。但是环境形势依然严峻，环境风险不断凸显，污染治理任务依然艰巨。图 1-5 和图 1-6 分别给出 2012 年我国主要大气污染物排放情况及 2012 年主要用能行业污染物排放量占比。

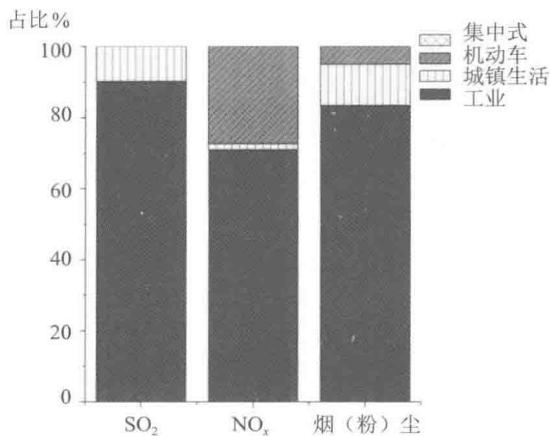


图 1-5 2012 年主要大气污染物排放情况

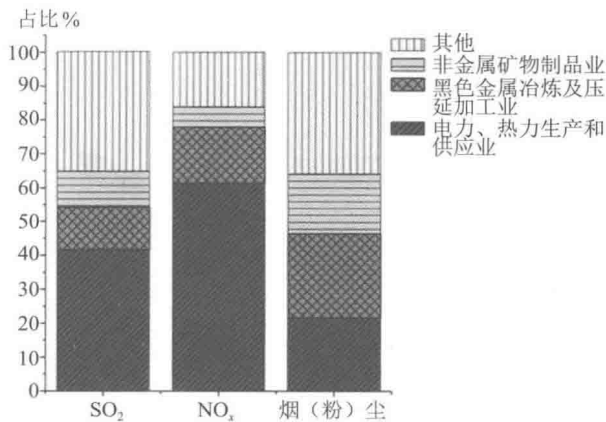


图 1-6 2012 年主要用能行业污染物排放量占比

1.1.1 二氧化硫排放情况

随着我国经济的快速发展,全国煤炭消耗量从1995年的12.8亿t一直增加到了2012年的36.2亿t。二氧化硫排放总量也随之急剧增加。2012年,全国废气中二氧化硫排放总量达2117.6万t。其中,工业废气中二氧化硫排放量为1911.7万t,占二氧化硫排放总量的90.3%;生活二氧化硫排放量为205.7万t,集中式污染治理设施(不含污水处理厂)二氧化硫排放量达0.3万t。其中,2012年单位国土面积二氧化硫排放强度平均约为2.19t/km²。

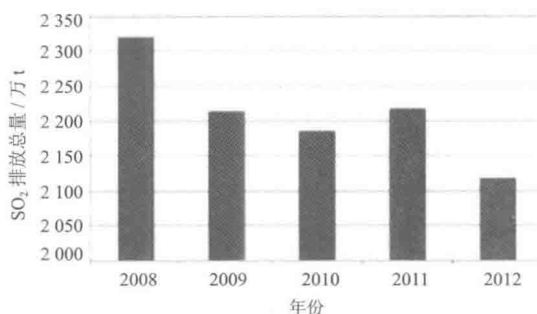


图 1-7 近年来我国 SO₂ 排放情况

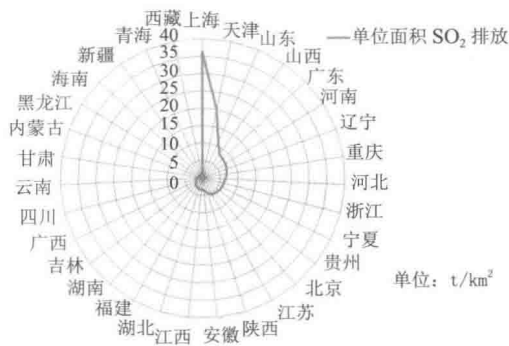


图 1-8 2012 年单位国土面积 SO₂ 排放情况

2012年,二氧化硫排放量超过100万t的省份依次为山东、内蒙古、河北、山西、河南、辽宁和贵州,7个省份的二氧化硫排放量占全国排放量的43.2%。2012年,调查统计的41个工业行业中,二氧化硫排放量位于前三位的行业依次为电力、热力生产和供应业,黑色金属冶炼及压延加工业,非金属矿物制品业,三个行业共排放二氧化硫1237.4万t,占重点调查工业企业二氧化硫排放总量的69.7%。

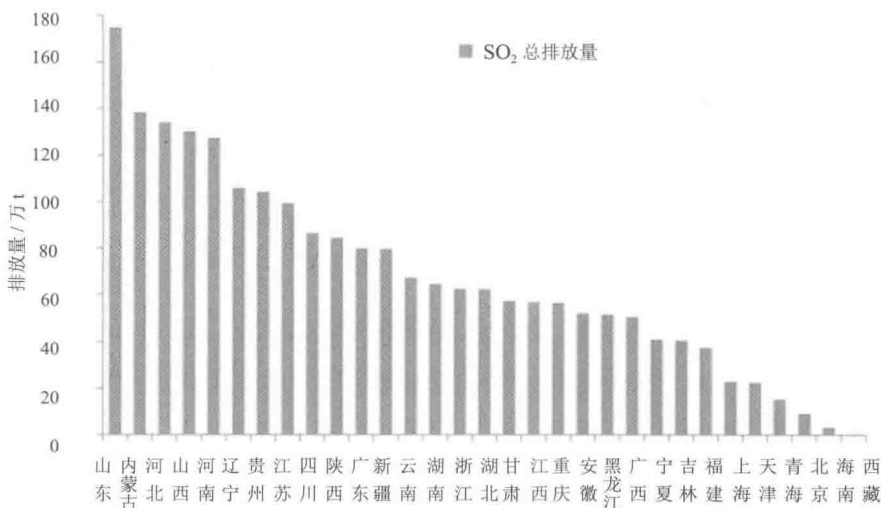
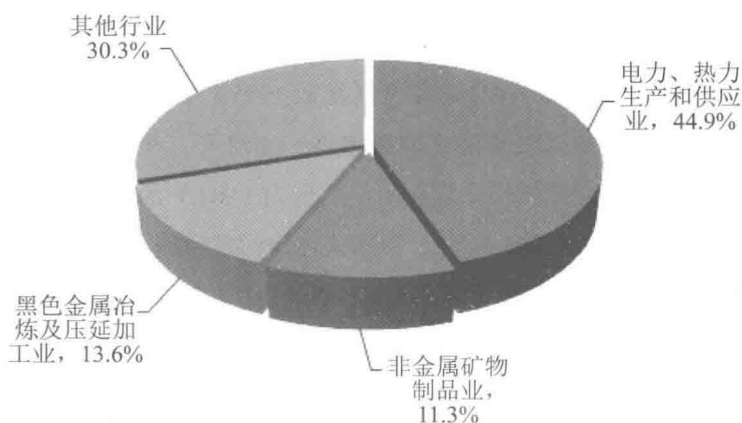
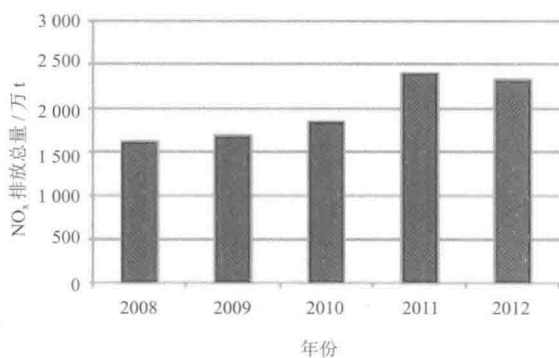
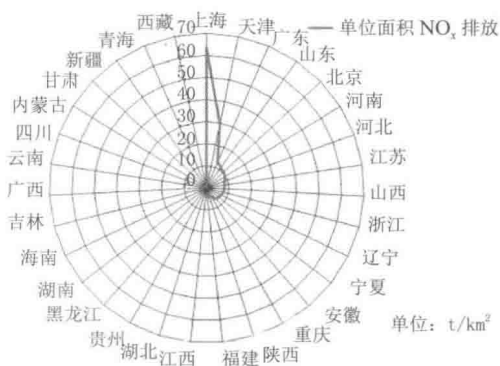


图 1-9 2012 年各地区 SO₂ 排放情况

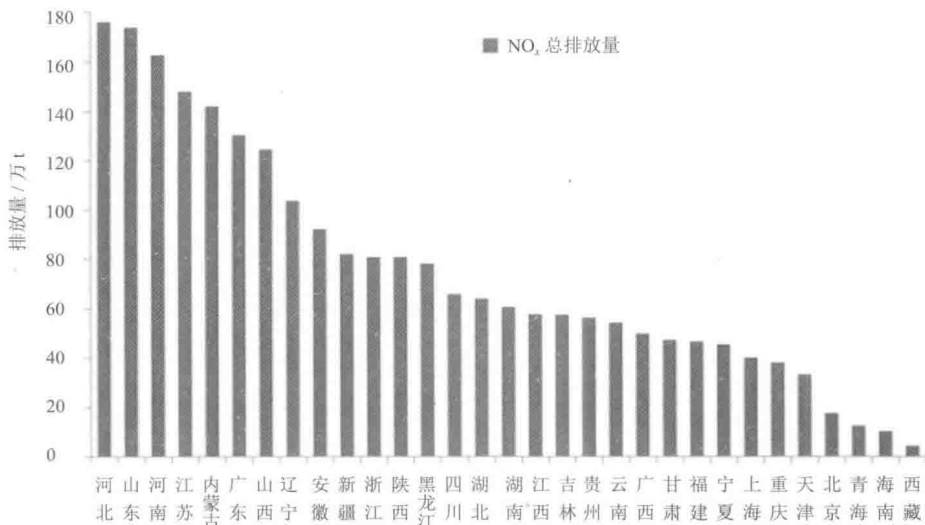
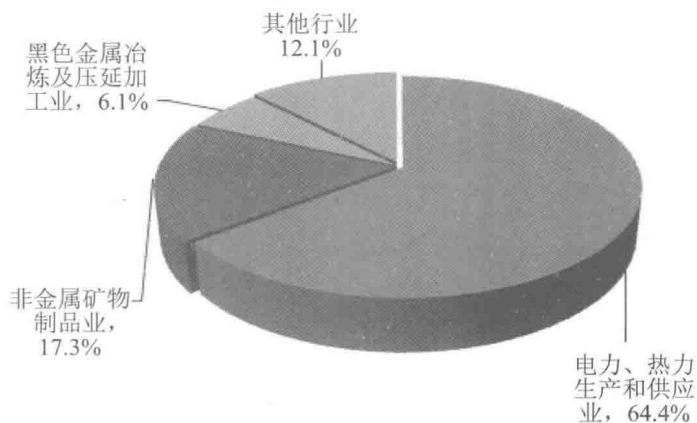
图 1-10 2012 年重点调查的工业行业企业 SO₂ 排放情况

1.1.2 氮氧化物排放情况

2012 年, 全国废气中氮氧化物排放总量 2 337.8 万 t。其中, 工业废气中氮氧化物排放量 1 658.1 万 t, 占氮氧化物排放总量的 70.9%; 生活氮氧化物排放量 39.3 万 t, 占氮氧化物排放总量的 1.7%; 机动车废气中氮氧化物排放量 640.0 万 t, 占氮氧化物排放总量的 27.4%; 集中式污染治理设施(不含污水处理厂)氮氧化物排放量 0.4 万 t。其中, 2012 年单位国土面积氮氧化物排放强度平均约为 2.42t/km²。

图 1-11 近年来我国 NO_x 排放情况图 1-12 2012 年单位国土面积 NO_x 排放情况

2012 年, 氮氧化物排放量超过 100 万 t 的省份依次为河北、山东、河南、江苏、内蒙古、广东、山西和辽宁, 8 个省份氮氧化物排放量占全国氮氧化物排放量的 49.7%。2012 年, 调查统计的工业行业中, 氮氧化物排放量位于前三位的行业依次为电力、热力生产和供应业, 非金属矿物制品业, 黑色金属冶炼及压延加工业, 三个行业共排放氮氧化物 1 390.1 万 t, 占重点调查工业企业氮氧化物排放总量的 87.9%。

图 1-13 2012 年各地区 NO_x 排放情况图 1-14 2012 年重点调查的工业行业企业 NO_x 排放情况

1.1.3 烟尘及工业粉尘排放情况

2012年,全国废气中烟(粉)尘排放总量1 234.3万t。其中,工业废气中烟(粉)尘排放量1 029.3万t,占烟(粉)尘排放总量的83.4%;生活烟(粉)尘排放量142.7万t,占烟(粉)尘排放总量的11.6%;机动车废气中烟(粉)尘(颗粒物)排放量62.1万t,占烟(粉)尘排放总量的5.0%;集中式污染治理设施(不含污水处理厂)烟(粉)尘排放量0.2万t。其中,2012年单位国土面积烟(粉)尘排放强度平均约为1.28t/km²。

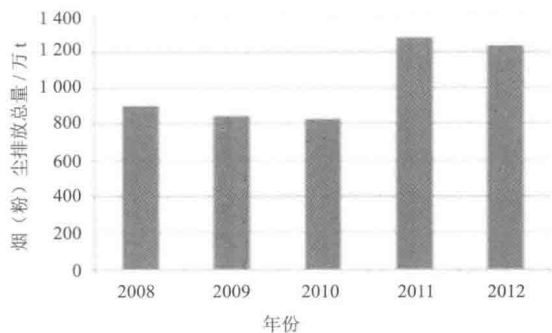


图 1-15 近年来我国烟（粉）尘排放情况

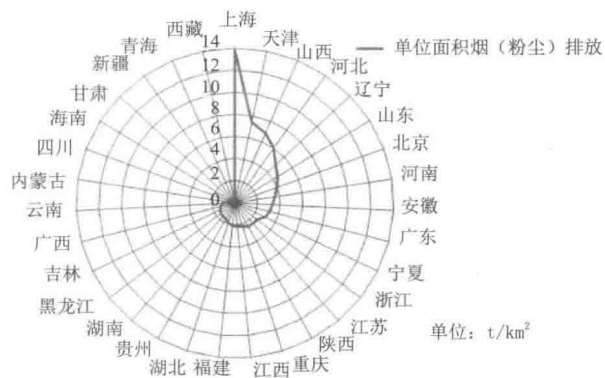


图 1-16 2012年单位国土面积烟（粉）尘排放情况

2012年，烟（粉）尘排放量超过50万t的省份依次为河北、山西、内蒙古、辽宁、黑龙江、新疆、山东和河南，8个省份烟（粉）尘排放量占全国烟（粉）尘排放量的53.0%。2012年，调查统计工业行业中，烟（粉）尘排放量位于前3位的行业依次为非金属矿物制品业，电力、热力生产和供应业，黑色金属冶炼及压延加工业，三个行业共排放烟（粉）尘659.3万t，占重点调查统计工业企业烟（粉）尘排放量的68.9%。

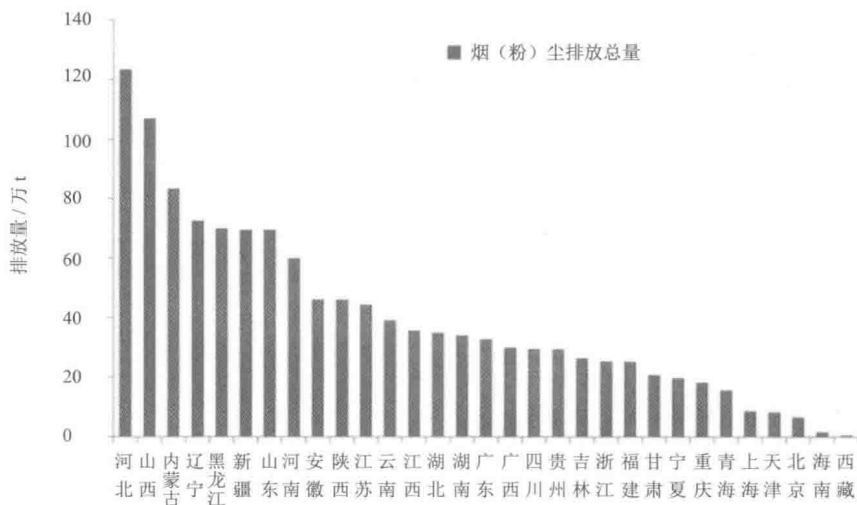


图 1-17 2012年各地区烟（粉）尘排放情况

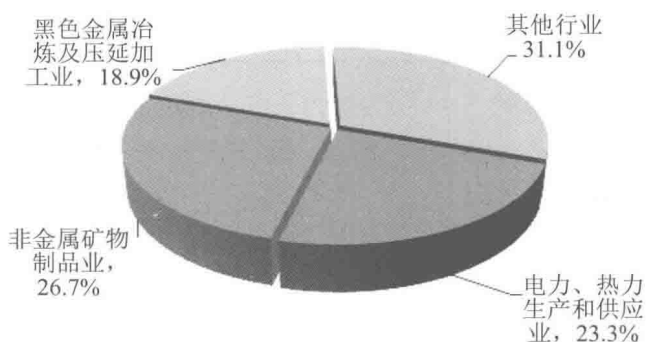


图 1-18 2012 年重点调查的工业行业企业烟（粉）尘排放情况

1.2 工业烟气污染物排放控制标准

我国针对大气污染物排放控制重点行业逐步推行严格的排放标准，以实现燃煤大气污染物的减排。现行的行业环保标准涵盖了电力、钢铁、水泥、焦化和燃煤锅炉等。各标准根据行业排放特点和污染物排放总量控制目标，制定了各污染排放环节的相应污染物浓度排放限值，并逐步加以完善。下文主要以火电厂、水泥厂及钢铁厂为例介绍重点工业源主要烟气污染物排放限值情况。

1.2.1 火电厂大气污染物排放标准

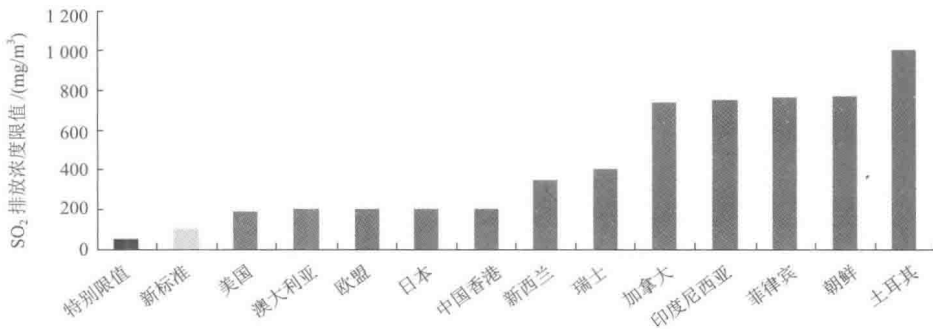
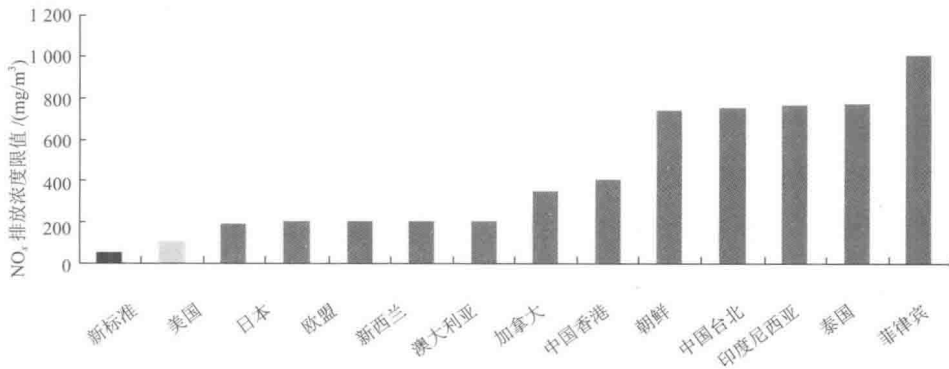
我国长期以来对火电厂产生的大气污染物的控制主要集中在烟尘和二氧化硫上，对氮氧化物排放的治理尚处于起步阶段，对氮氧化物的总量控制也刚列入工作日程。“十二五”规划将氮氧化物首次列入约束性指标体系，要求总量减少 10%，氮氧化物已经成为我国下一阶段污染减排的重点。2011 年，我国出台了新的《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2011），对大气污染物的排放提出了更高的要求，且第一次对燃煤锅炉汞的排放提出了限制。新的标准调整了大气污染物排放浓度限值，规定了现有火电厂锅炉达到更加严格的排放浓度限值的时限，取消了全厂二氧化硫最高允许排放速率的规定，增设了燃气锅炉大气污染物排放浓度限值及大气污染物特别排放限值。燃煤电站锅炉大气污染物排放限值如表 1-1 所示。图 1-19 至图 1-21 给出了中国与世界一些国家的火电厂大气污染物排放限值对比情况。

表 1-1 燃煤电站锅炉大气污染物排放限值

单位: mg/m^3

污染物项目	使用条件	重点地区	非重点地区*	2003 版标准
烟尘	全部	20	30	50
SO_2	全部	50	100	400
NO_x (以 NO_2 计)	全部	100	100	450
汞及其化合物	全部	0.03	0.03	—

注 (*): 除广西壮族自治区、重庆市、四川省、贵州省外。

图 1-19 SO_2 排放标准对比图 1-20 NO_x 排放标准对比