



环境保护部环境规划



区域煤炭消费总量控制技术 方法与政策体系研究

**Study on Technical Methods and Policy System
for Regional Coal Consumption Cap**

环境保护部环境规划院

2012.10

This report is funded by Energy Foundation.

It does not represent the views of Energy Foundation.

本报告由能源基金会资助。

报告内容不代表能源基金会观点。

课题组成员

负责人：杨金田 环境保护部环境规划院，副总工，研究员

陈潇君 环境保护部环境规划院，副研究员

参加人：雷 宇 环境保护部环境规划院，副研究员

宁 淼 环境保护部环境规划院，副研究员

孙亚梅 环境保护部环境规划院，博士

郑 伟 环境保护部环境规划院，副研究员

薛文博 环境保护部环境规划院，博士

刘 伟 环境保护部环境规划院，博士

王 宁 环境保护部环境规划院，助理研究员

摘 要

一、 实施区域煤炭消费总量控制势在必行

1、 煤炭消费是我国空气污染的主要影响因素

我国煤炭消费的总量、分布、结构及技术水平等因素均对大气环境造成了严重影响。首先，煤炭消费增长迅速导致巨大的污染物排放负荷。目前我国煤炭消费量占全球煤炭消费总量的 50%，远超美国（13.5%）、欧盟（7.7%）、日本（3.2%）等其他经济体，巨大的煤炭消费量导致我国二氧化硫、氮氧化物、大气汞排放量高居全球首位。其次，煤炭消费空间分布不均衡引发区域性复合型大气环境问题。突出表现为以三区十群为代表的重点区域，单位面积煤炭消费量是全国平均水平的 4 倍左右、单位面积污染物排放强度是全国平均水平的 3 倍左右；由于污染物排放密集，加之机动车保有量增长迅速、重化工业快速发展，各种污染物相互作用并远距离传输，以 PM_{2.5}、O₃、酸雨为特征的区域复合型污染呈加剧态势。第三，煤炭消费结构不合理加剧了城市煤烟型污染。目前我国电力行业煤炭消费量仅占全国煤炭消费总量的 50%左右，远低于美国 90%的水平，大量的煤炭消费集中于工业锅炉、炼焦炉和建材窑炉，复杂的排放源构成使得我国成为全球大气污染控制体系最为庞大、构成最为复杂、减排难度最大的国家，在一定程度上也加剧了城市煤烟型污染。最后，煤炭利用与污染控制技术较低导致污染物排放绩效偏高。目前我国燃煤锅炉运行

热效率在 60%左右，比先进国家低 15%~20%，并且基本没有脱硝措施，脱硫和除尘技术水平也偏低。原煤煤质差、动力煤入洗率低，也影响了我国的燃煤污染控制效果，目前我国原煤平均入洗率仅为 51%，低于发达国家水平（55%~90%）。

2、煤炭消费控制是改善重点区域空气质量的必要条件

相关研究指出，要使我国 80%以上城市空气质量达到《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准的要求，至少要使我国二次颗粒物的气态前体物和一次颗粒物的排放量在 2010 年的基础上削减 40%~50%。对于污染物排放集中、灰霾污染严重的华北地区，则需要更大力度的减排。如果按照“十一五”以来每五年主要污染物减排 10%左右的速度，需要 20 年才能实现上述目标，显然无法应对当前空气质量快速恶化的严峻局面。同时，随着烟气治理技术的推广，末端治理措施的减排空间逐步压缩，如果仅依赖工程技术手段，要在煤炭消费高速增长的情况下实现各种污染物排放量削减过半的目标，几乎是不可能完成的任务，必须从能源结构和产业结构调整入手，实施区域煤炭消费总量控制，从源头上减少各种污染物的产生量，为解决区域空气污染问题创造条件。

3、煤炭消费总量控制已具备实践基础

2010 年 5 月，国务院办公厅转发环境保护部等部门《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量指导意见》，明确提出了“严格控制重点区域内燃煤项目建设，开展区域煤炭消费总量控制试点工

作”。目前北京、天津、乌鲁木齐等城市，为改善空气质量，已经开始实施煤炭消费控制措施。具体包括：设定煤炭消费总量控制目标，关闭、搬迁污染企业，控制新建燃煤电厂和燃煤供热锅炉，现有燃煤锅炉和其他燃煤设施改用天然气、电力等，天津市还将煤炭消费增量控制指标分解到重点企业和各区县政府，建立煤炭消费总量跟踪监测、预警和考核机制，确保控煤效果。此外，我国从“十二五”开始实施的能源消费总量控制制度，将控制指标分解落实到各行政区，也对各地的煤炭消费形成了制约。实践表明，控制煤炭消费总量，对于减少燃煤大气污染物排放、改善城市空气质量具有重要意义，并且在国家政策层面和控制指标分解、监测、统计、考核等操作层面已经具备实施条件。

二、发达国家燃煤大气污染控制经验

发达国家控制燃煤污染的经验表明，通过调整能源消费结构、优化煤炭使用结构、应用先进技术等综合手段，可以大幅度削减大气污染物排放量并改善空气质量。近半个世纪以来，煤炭在欧盟国家一次商品能源消费结构中的比重由 50%降低至 15%左右，天然气和核能消费比重提高。欧盟煤炭消费量持续下降的原因，除了天然气、核能使用量的增加为煤炭替代创造了条件，还因为工业化基本完成，冶金、建材等高煤耗行业的能源需求量逐年降低，同时能源利用效率不断提高。日本的能源资源主要依赖外部供给，能源品种和产业结构受到诸多制约，因此更侧重于应用先进技术实现节能与污染物排放量的削

减，这也是我国目前在燃煤污染控制中采取的主要手段。

美国的煤炭消费量近半个世纪以来增长了约 1 倍，但煤炭消费过程中的大气污染物排放量却在上世纪 80 年代以后开始下降，除了大气污染控制水平提高的因素以外，更主要得益于煤炭消费向大气污染物排放控制水平相对较高的电力部门集中。以 SO₂ 排放控制为例，1970~2010 年期间，美国电力部门的吨煤 SO₂ 排放系数降低了 90%，工业锅炉的 SO₂ 排放系数下降了 50% 左右，总体水平比电力部门的排放系数高出约 4 倍。从煤炭消费的部门分布来看，1950 年以来，美国电力部门的煤炭消费量增长了 10 倍，而工业煤炭消费量减少了 2/3，民用煤炭消费减少了 99%，2010 年电力部门的煤炭消费量占美国煤炭消费总量的比例达到了 93%。美国的经验表明，积极调整煤炭消费结构，控制分散、难以控制和难以监管的设备（如工业锅炉）的煤炭消费总量，同时以技术手段控制大型集中式燃煤锅炉（如电厂）的排放，也能有效地降低大气污染物的排放量。

三、煤炭消费总量控制框架体系

（一）政策内涵

煤炭消费总量控制是以控制一定时段内、一定区域内煤炭消费总量为核心的能源与环境管理政策体系，其基本出发点是改善区域空气质量，使城市空气质量达标，并实现污染物总量控制目标的要求，从源头上实现多污染物综合控制与节能减碳。煤炭消费总量控制包含三大关键要素：一是煤炭消费总量控制范围，二是煤炭消费总量控制目

标，三是煤炭消费总量控制指标的地区和行业分配。煤炭消费总量控制的对象应是燃煤污染严重、迫切需要采取相应措施改善空气质量的区域，基于空气质量改善要求与煤炭消费控制的现实条件，客观设定煤炭消费总量控制目标；随着空气质量改善要求的不断提高和煤炭使用技术与政策的变化，不同时期的煤炭消费总量控制目标要进行相应调整。

（二）框架体系

煤炭消费总量控制政策体系，涵盖宏观经济政治决策、能源与环境管理、社会文化引导等诸多领域，包括发展战略、规划、法律、法规、标准、政策等多重调控手段，并由相应的管理制度以及技术装备、文化氛围等作为支撑。目的是促进煤炭需求总量控制，调整以煤为主的能源供应结构，优化工业布局和煤炭利用结构，应用先进的燃煤技术和污染治理技术，降低煤炭消费的污染物排放量。政策框架如图 1 所示。

首先要科学制定国民经济与社会发展规划，对未来生活水平、经济总量、产业结构进行正确定位，合理设定 GDP 增速，积极推进产业结构调整，降低煤炭消费需求；其次要调整能源发展战略，从以粗放的供给满足增长过快需求的模式，转变为以科学的供给保障合理需求的能源供需新模式，并积极发展天然气、核电、水电等非煤能源，为减少煤炭消费总量创造条件；第三，要从全局角度对地区和行业发展进行优化部署，基于环境承载力安排耗煤产业的空间布局；第四，

通过法律法规、排放标准、行政审批、经济政策等综合手段，促进煤炭的清洁、高效利用，对节能环保技术、可再生能源发展等予以扶持；第五，建立重点区域煤炭消费总量控制管理制度，将煤炭消费总量控制作为约束性指标，纳入政绩考核体系，并建立相应的评估、考核与责任追究制度；第六，加快发展洁净煤技术、高效用能技术、先进发电技术等；最后，加强宣传教育，倡导绿色消费和清洁生产。

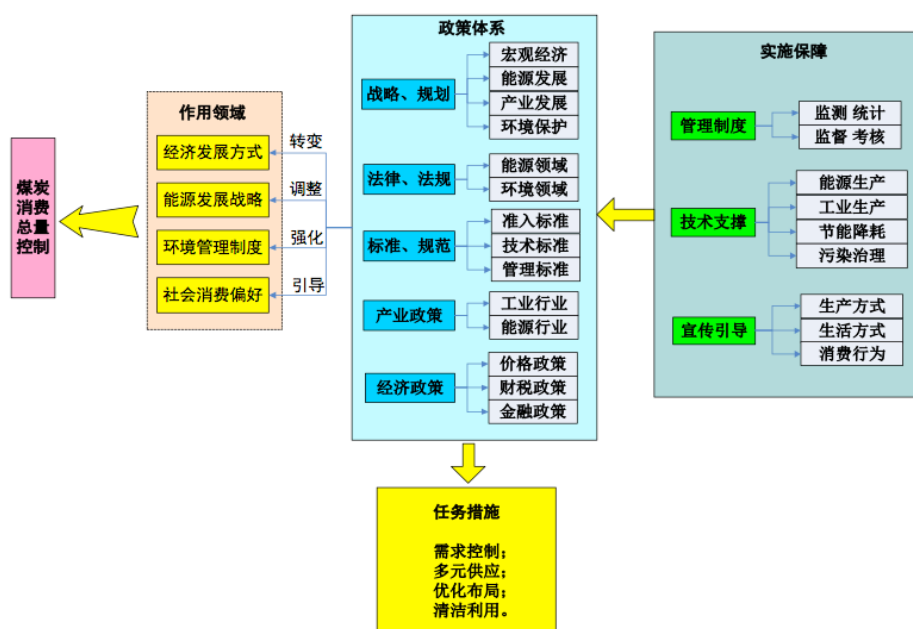


图 1. 煤炭消费总量控制政策框架图

（三）实施路线图

根据我国能源发展战略，在 2020 年以前，特别是“十二五”时期，是我国全面转向科学发展轨道、决定能源转型的攻坚任务能否完成的关键期，在此阶段，经济发展方式应实现重大调整，能源消费增长速度和结构将有显著变化。通过实施科学、绿色、低碳能源战略，预计

到 2030 年前后，我国能源发展将出现历史性的转折，其标志是：节能、提效达到先进水平，能源结构明显改善，煤炭年利用量越过峰值，煤炭科学、安全生产和洁净化利用达到先进水平，燃煤污染问题基本解决，二氧化碳排放量达到峰值^[1]。基于以上战略判断，并从空气质量改善的实际需要出发，从“十二五”开始，我国就应开始实施区域煤炭消费总量控制，尤其是在空气污染严重的京津冀、长三角和珠三角三大重点区域，以煤炭消费总量控制推动经济转型，为节能减排和空气质量达标创造条件；“十三五”及以后应结合国家大气污染防治战略，将煤炭消费总量控制范围扩大到其他大气污染防治重点区域，并结合温室气体排放控制需求，择期在全国范围内全面推行煤炭消费总量控制。从控制模式上看，近期建议采取区域控制与行业控制相结合的控制模式，中长期应根据温室气体排放控制需求，将国家总量控制提上议事日程。

四、实施煤炭消费总量控制的政策措施

（一）科学制定并分解控制目标，实施煤炭消费总量控制目标考核

首先要综合考虑各地区空气质量、大气污染物减排潜力、产业结构、煤炭消费现状等因素，科学设定煤炭消费总量控制区范围与控制目标，针对不同地区设定差异化的煤炭消费总量控制目标。对于煤炭消费强度最高、灰霾污染严重的京津冀地区，应首先划定为煤炭消费

¹中国能源中长期（2030、2050）发展战略研究：综合卷.北京：科学出版社，2011.

注 2：中国数据为生活能源消费构成，美国数据为除工业和交通运输外其他终端能源（包括生活、农业和林业）消费构成。

³王庆一，2010 能源数据。

⁴发改产业[2006]328 号 国家发展改革委关于加快焦化行业结构调整的指导意的通知

总量削减区，要求其尽快减少煤炭消费总量；对于长三角、珠三角等区域复合型污染严重地区，应加强煤炭消费控制力度，实现区域煤炭消费总量零增长。第二，在煤炭消费总量控制区内，要将煤炭消费总量控制指标逐级分解，确定各级行政区、重点行业、重点企业的控制目标。第三，要建立煤炭消费总量控制目标责任制，加强监督考核，将目标完成情况做为各级人民政府和领导干部综合考核评价的重要依据，实行问责制，并向社会公开。

（二）优化煤炭消费空间布局，重点地区增加天然气和电力输入量

在产业发展规划和重大项目布局方面，要充分考虑地区环境容量、资源禀赋等因素，将煤炭消费总量控制指标作为重点区域建设项目审批的前置条件，严格项目准入。京津冀地区禁止新建除热电联产以外的燃煤电厂以及钢铁、水泥、焦炭、有色冶炼等高污染项目，并加大落后产能淘汰力度，关闭、搬迁现有污染企业。在能源供应方面，京津冀地区要增加天然气供应，提高电力输入量。

（三）调整燃料煤消费结构，降低小型燃煤设施煤炭消费比例

由于火电行业大气污染物排放集中，烟气脱硫、脱硝、除尘技术成熟，单位燃煤的污染物排放强度远低于小型燃煤设施，因此应逐步提高电力行业的煤炭消费比例，积极推进热电联产为工业和民用采暖供热，降低其他工业锅炉和民用燃煤设施用煤比例。在城市内划定煤炭禁燃区，分散的燃煤锅炉逐步改用清洁能源或由集中供热锅炉替

代。对于农村民用炊事、采暖用煤，应积极推进太阳能、沼气、电力、天然气等替代燃煤。

(四) 应用高效洁净的燃煤技术，减少单位煤炭消费的污染物产生量

为提高燃煤品质，应严格限制高硫份、高灰分煤炭的开采与使用，并提高动力煤洗选比例，力争将煤炭入洗率逐步提高到70%以上，接近发达国家水平。应用超(超)临界发电技术、整体煤气化联合循环(IGCC)等高效、洁净发电技术，并继续推动电厂烟气脱硫、脱硝、除尘技术的深化应用。推广高效环保的锅炉燃烧技术，提高煤炭燃烧效率，加强燃煤锅炉大气污染物排放控制。

(五) 推行多样化政策，促进能源消费结构与煤炭利用方式调整

一是严格实施工业能耗限额和污染物排放标准，在重点控制区执行大气污染物特别排放限值，促进生产技术、煤炭利用技术和污染物排放控制水平的提升。二是充分发挥价格、财税、金融等经济政策的激励作用，将煤炭开发与利用过程中的环境损害恢复成本纳入煤炭价格形成机制，并通过强制性市场份额、投资补贴、税收优惠等各种措施，鼓励清洁能源发展，使清洁能源真正具有市场竞争优势。三是推行节能环保发电调度，按照“可再生能源-核电-天然气发电-燃煤发电-燃油发电”的优先顺序进行电力调度，同类型火电机组按照机组能耗和污染物排放水平由低到高排序，促使煤耗低、污染小的先进

机组多发电，从而降低电力行业煤炭消耗和污染物排放的总体水平。

目 录

第 1 章 我国煤炭消费与大气环境影响现状	15
1.1 我国煤炭消费对大气环境的影响	15
1.1.1 煤炭消费高速增长带来大气污染物与温室气体的大量排放	15
1.1.2 煤炭消费区域分布不均衡导致区域性复合型大气环境问题	17
1.1.3 工业与居民生活终端煤炭消费比例高加剧了城市煤烟型大气污染 ..	19
1.1.4 煤炭利用与污染控制水平较低导致大气污染物排放绩效偏高	21
1.2 节能环保要求对我国煤炭消费的制约	24
1.2.1 环境空气质量达标要求对煤炭消费的制约	24
1.2.2 不断加严的排放标准对煤炭消费的制约	24
1.2.3 节能与应对气候变化任务对煤炭消费的制约	26
1.3 实施煤炭消费总量控制势在必行	27
第 2 章 燃煤大气污染控制的国际经验	29
2.1 发达国家煤炭消费量的变化趋势	29
2.2 欧洲的煤炭消费总量削减与大气污染控制	31
2.2.1 欧洲跨界大气污染控制与煤炭消费量的削减	31
2.2.2 英国煤炭消费量的削减与大气污染物排放量的削减	33
2.2.3 欧洲煤炭消费量削减对大气污染物减排的贡献	34
2.3 美国的煤炭消费部门分布与大气污染控制	35
2.3.1 美国煤炭消费量的部门分布	35
2.3.2 美国煤炭消费过程的大气污染物排放水平	36
2.3.3 美国大气污染控制政策对煤炭消费结构的影响	37
2.4 日本煤炭消费技术进步与大气污染控制	39
2.4.1 日本能源和煤炭消费结构的变化趋势	39
2.4.2 日本大气环境政策和空气质量的变化趋势	41
2.4.3 技术进步在日本大气污染控制中的作用	42

2.5	发达国家经验的启示.....	42
第3章	我国煤炭消费控制总体思路.....	44
3.1	我国燃煤污染控制实践.....	44
3.1.1	20世纪80年代重点控制燃煤硫份.....	45
3.1.2	1990年加强两控区酸雨和二氧化硫污染控制.....	45
3.1.3	“十一五”强化污染物末端治理工程.....	47
3.1.4	“十二五”开始重视煤炭消费总量控制等综合性措施.....	48
3.2	煤炭消费控制内涵.....	49
3.3	煤炭消费总量影响因素分析.....	51
3.4	煤炭消费总量控制框架设计.....	53
3.4.1	政策定位.....	53
3.4.2	控制模式.....	54
3.4.3	政策框架.....	55
3.4.4	实施路线图.....	58
第4章	煤炭消费总量控制目标测算技术方法.....	60
4.1	城市和区域煤炭消费总量控制目标测算方法.....	60
4.1.1	技术路线.....	60
4.1.2	淄博市空气质量达标约束下的最大煤炭消费量计算.....	61
4.1.3	环境约束下区域最大允许煤炭消费总量估算.....	66
4.2	行业煤炭消费总量控制目标测算方法.....	66
4.2.1	重点行业煤炭消费特征.....	66
4.2.2	工业行业节能减排政策要求.....	69
4.2.3	基于节能减排要求的行业煤炭消费总量控制目标测算方法.....	71
第5章	区域煤炭消费控制实施途径.....	74
5.1	合理划分煤炭消费总量控制区，科学制定并分解控制目标.....	74
5.2	优化煤炭消费空间布局，重点地区增加天然气和电力输入.....	75
5.3	调整燃料煤消费结构，降低小型燃煤设施煤炭消费量.....	76
5.4	应用先进技术，提高煤炭加工与转化效率.....	76

5.5 改善煤炭质量，提高动力煤洗选比例	77
第 6 章 煤炭消费控制政策建议	78
6.1 完善法规标准，为煤炭消费总量控制提供支撑	78
6.1.1 加强能源、环保法律法规建设	78
6.1.2 完善能源、环保标准体系	79
6.2 健全管理制度，落实煤炭消费总量控制任务	79
6.2.1 建立区域煤炭消费总量控制制度	79
6.2.2 建立“倒逼”机制，促进发展方式转变	80
6.3 运用经济政策，促进能源行业清洁发展	80
6.3.1 改革能源价格机制	80
6.3.2 完善财税金融政策	81
6.3.3 推广节能环保发电调度	82
参考文献	84

第1章 我国煤炭消费与大气环境影响现状

我国煤炭消费总量大、地区分布不均衡、消费结构不合理及技术水平低等因素带来了严重的大气污染问题，并制约着城市与区域空气质量的改善。同时，日益加严的环境空气质量标准、主要大气污染物持续减排要求、节能与应对气候变化任务以及不断修订的排放标准等又对我国煤炭消费构成反向制约作用。基于我国现阶段煤炭消费与大气环境保护的双向约束关系，为实现二者的协调发展、改善城市与区域环境空气质量、促进煤炭合理消费，实施煤炭消费控制势在必行。

1.1 我国煤炭消费对大气环境的影响

我国以煤为主的能源消费结构带来了严重的环境问题。由于煤炭消费量过大，我国二氧化硫、氮氧化物排放量高居全球首位，据国际机构估算，中国大气汞、二氧化碳年排放量也显著高于其他国家。我国部分城市群地区由于煤炭消费过于集中，单位面积的大气污染物排放量显著高于全国平均水平，空气污染问题也最为严重，而且随着机动车数量的日益增多，区域性复合型空气污染日益突出。

1.1.1 煤炭消费高速增长带来大气污染物与温室气体的大量排放

(1) 我国煤炭消费量增长迅速

煤炭是我国重要的基础性能源，从上世纪八十年代以来，我国煤炭占一次能源消费量的比例一直在 70%左右。随着经济高速增长，我国的煤炭消费量也随之增长，尤其是 2002~2007 年，我国一次能源消费量年均增速高达 12%，2008 年之后能源消费增速有所放缓，但 2010 年与 2000 年相比，我国的能源消费总量和煤炭消费总量仍然增长了一倍以上（见图 1-1）。

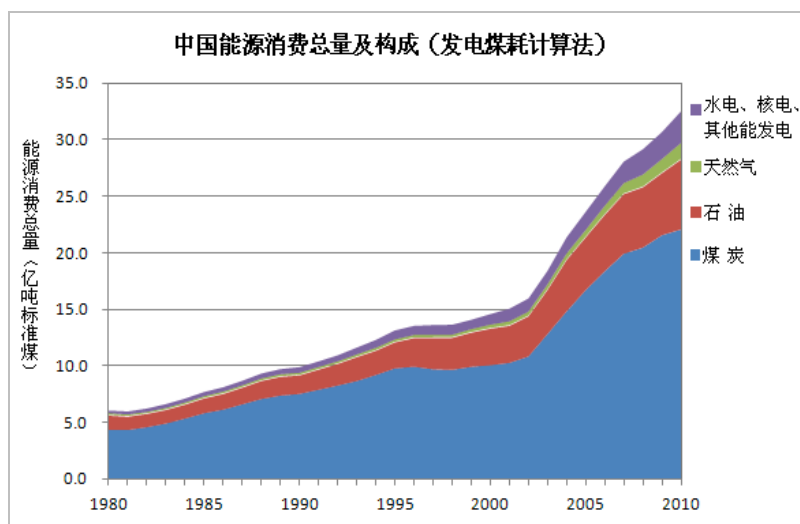


图1-1. 我国能源消费结构

(数据来源:《中国能源统计年鉴 2011》.)

根据《BP 世界能源统计年鉴 2011》，2010 年中国已经超过美国成为世界上最大的能源消费国，中国的能源消费量占全球的 20.3%（美国为 19%），同时，中国也是世界上最大的煤炭消费国，占全球煤炭消费量的 48.2%！比较各国的能源消费结构可以看出，美国和欧盟的煤炭消费占一次能源消费量的比例分别为 23.0%和 15.6%，而石油、天然气、核能消费比例远高于我国，我国 2010 年的煤炭消费量分别为美国的 3.3 倍、欧盟的 6.4 倍（见表 1-1）。

表1-1. 2010年能源消费量国际比较 (单位: 百万吨油当量)

	石油	天然气	煤炭	核能	水电	可再生 能源	总计
中国	428.6	98.1	1713.5	16.7	163.1	12.1	2432.2
美国	850.0	621.0	524.6	192.2	58.8	39.1	2285.7
欧盟	662.5	443.3	269.7	207.5	83.0	66.9	1732.9
世界总计	4028.1	2858.1	3555.8	626.2	775.6	158.6	12002.4

数据来源:《BP 世界能源统计年鉴》，2011.6.

(2) 煤炭消费带来大量的大气污染物与温室气体排放

我国以煤为主的能源消费结构带来了严重的空气污染和温室气体排放问题。我国二氧化硫排放量的 90%、氮氧化物排放量的 67%、烟尘排放量的 70%、人为源大气汞排放量的 40%以及二氧化碳排放量的 70%都来自于燃煤。

巨大的煤炭消费量导致我国二氧化硫、氮氧化物排放量高居全球首位，我国

二氧化硫排放量分别为美国的 2.6 倍、欧盟的 4.5 倍，氮氧化物排放量分别为美国的 1.8 倍、欧盟的 2.4 倍；据国际机构估算，我国大气汞、二氧化碳年排放量也显著高于其他国家（见表 1-2）。为了有效改善环境质量、保护人民群众身体健康，应对温室气体减排压力，我国在加大污染末端治理力度的同时，还应努力控制煤炭消费量，从源头减少大气污染物产生量。

表1-2. 大气污染物与温室气体排放量国际比较

	SO ₂ (万吨)	NO _x (万吨)	PM ₁₀ (万吨)	PM _{2.5} (万吨)	大气 Hg (吨)	CO ₂ ^a (亿吨)
中国 ^b	2267.8	2273.6	1277.8	—	825.2	67.03
美国 ^c	860.0	1243.9	1023.2	413.4	103.0	58.27
欧盟 ^d	501.5	937.4	197.1	129.3	73.4	40.65

数据来源：

- a. 中国、美国和欧盟的 CO₂ 排放数据全部为 CAIT 计算的 2007 年排放量（CAIT, The Climate Analysis Indicators Tool developed by the World Resources Institute）；
- b. 中国 SO₂、NO_x 和烟尘排放量为 2010 年数据，大气汞排放数据为联合国环境规划署（UNEP）计算的 2005 年排放量；
- c. 美国大气污染物排放数据为 2010 年排放量，摘自 EPA 官方排放清单数据；
- d. 欧盟 27 国大气污染物排放数据为 2009 年排放量，摘自欧洲环境署 LRTAP 数据库。

1.1.2 煤炭消费区域分布不均衡导致区域性复合型大气环境问题

（1）我国煤炭消费区域分布不均衡

据统计，2010 年京津冀、长三角、珠三角地区，以及辽宁中部、山东、武汉及其周边、长株潭、成渝、海峡西岸、山西中北部、陕西关中、甘肃兰白、新疆乌鲁木齐城市群等 13 个经济发展较快地区所在的省份，以占全国 14% 的国土面积，产生近 70% 的经济总量，消费了 48% 的煤炭，单位面积 GDP 为全国平均水平的 5 倍，单位面积煤炭消费量为全国平均水平的 4 倍，如图 1-2、图 1-3 所示。

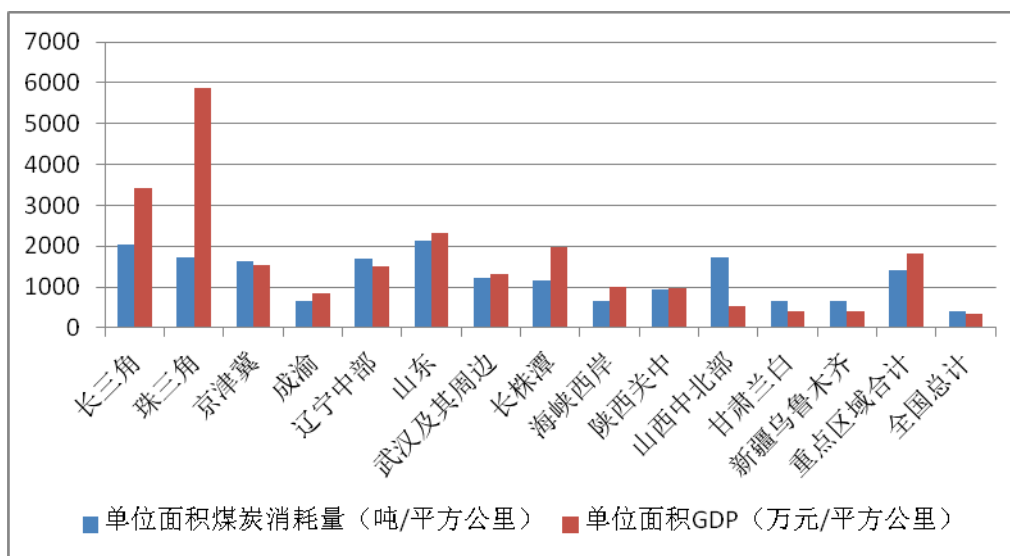


图1-2. 重点区域单位面积煤炭消耗情况

(数据来源:《中国统计年鉴 2010》; 中电联,《电力工业统计资料提要》; 环保部,《“十二五”主要污染物总量控制规划》.)

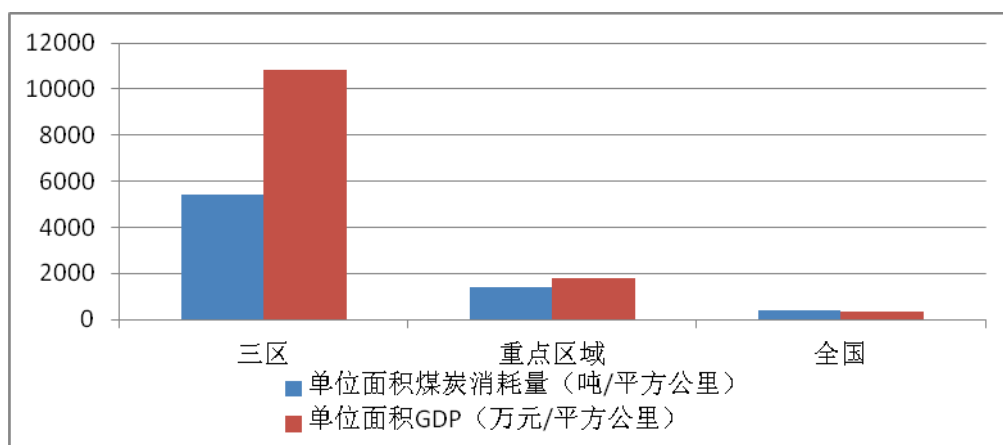


图1-3. 重点区域单位面积煤炭消耗量与全国平均水平的比较

(数据来源同图 1-2.)

(2) 区域性复合型大气污染问题严重

由于单位国土面积承载了巨大的污染物排放,以三区十群为代表的部分重点区域城市大气污染十分严重。2010 年重点区域 116 个监测城市二氧化硫、可吸入颗粒物年均浓度分别为 0.039 毫克/立方米、0.085 毫克/立方米,为欧美发达国家的 2~4 倍;二氧化氮年均浓度为 0.034 毫克/立方米,卫星数据显示,北京到上海之间的工业密集区为我国对流层二氧化氮污染最严重的区域。按照我国新修订的环境空气质量标准评价,重点区域将有 80%以上的城市达不到国家二级标准。

由于重化工业的快速发展和机动车保有量的快速增长，以上重点区域复合型大气污染也日益突出，以细颗粒物、臭氧、酸雨为特征的二次污染呈加剧态势。2010年7个城市PM_{2.5}监测试点的年均值为0.047毫克/立方米，超过世界卫生组织推荐的发展中国家最宽松限值要求的35%；臭氧监测试点数据表明，部分城市臭氧超过国家二级标准的天数达到20%，有些地区多次出现臭氧最大小时浓度超过欧洲警报水平（240ppb）的重污染现象。复合型大气污染导致能见度大幅度下降，京津冀、长三角、珠三角等区域每年出现灰霾污染的天数达100天以上，个别城市甚至超过200天。

1.1.3 工业与居民生活终端煤炭消费比例高加剧了城市煤烟型大气污染

根据《中国统计年鉴2011年》煤炭平衡表，2010年我国煤炭消费总量31.22亿吨，其中22.79亿吨用于加工转换，包括发电、供热、炼焦等；6.81亿吨用于工业终端消费；1.62亿吨用于其他终端消费，如生活消费等。从煤炭消费的行业分布来看，2010年电力及热力生产供应业是第一用煤大户，占工业煤炭消费总量的51.06%；其次为石油加工炼焦及核燃料加工业、黑色金属冶炼及压延加工业（以下简称钢铁行业）、非金属矿物制品业（以下简称建材行业）等，占工业煤炭消费总量的比例依次为10.06%、9.53%和7.94%。（见图1-4）。

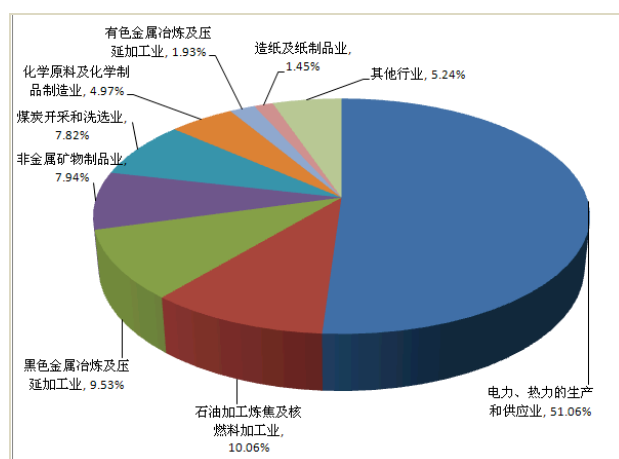


图1-4. 2010年工业分行业煤炭消费量比例

（数据来源：《中国能源统计年鉴2011》。）

上述重点耗煤工业行业同时也是我国大气污染物排放大户，尤其是电力、钢铁和建材行业，三者煤炭消费量占到全国工业煤炭消费量的68.6%，其污染物排

放量之和分别占到了工业二氧化硫排放量的 73.0%、工业氮氧化物排放量的 83.5%、工业烟尘排放量的 65.9%以及工业粉尘排放量的 79.9%（见图 1-5）。可见，除燃煤机组外，我国煤炭消费及大气污染物排放还大量集中于工业锅炉、烧结机和建材窑炉等。复杂的排放源构成，工业锅炉、烧结机和建材窑炉所配备的烟气治理设施的落后，使得我国成为全球大气污染控制体系最为庞大、构成最为复杂、减排难度最大的国家。

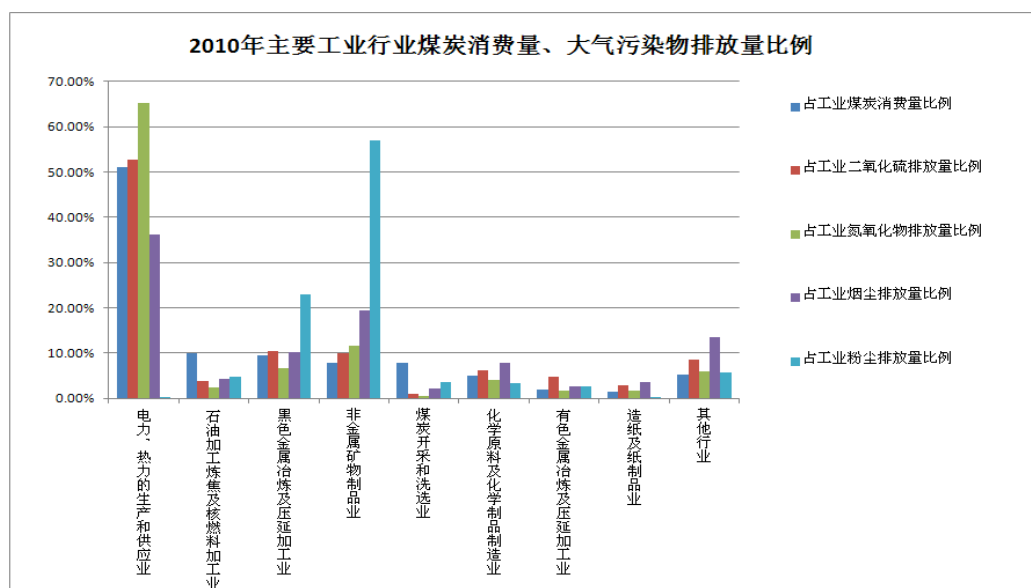


图1-5. 2010年重点行业燃煤及大气污染物排放比例

（数据来源：《中国能源统计年鉴 2011》，《中国环境统计年报 2010》。）

从发达国家的能源消费结构来看，美国的煤炭消费主要集中在电力行业，占全国煤炭消费量的 90%以上，远高于我国 50%左右的比例。日本的煤炭消费主要集中于电力和钢铁行业，且近年燃煤发电的比例有所上升。除电力行业外，美国、日本等发达国家，在交通运输、生活消费、农业、林业等部门的终端能源消费中几乎无煤炭消费，而我国上述部门煤炭消费在终端能源消费中的比重仍然较大。2010年我国居民生活终端煤炭消费量为 9159.2 万吨，占到生活消费能源总量的 28.1%（见图 1-6）。

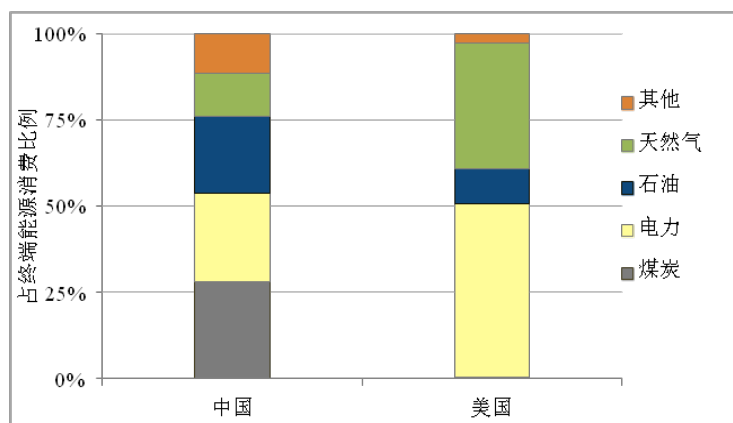


图1-6. 中国及美国生活能源消费构成比较²

（数据来源：《中国能源统计年鉴 2011 年》，中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究重大咨询项目《煤利用中的污染控制和净化技术课题研究报告》。）

综上所述，我国每年有大量煤炭用于工业和居民生活终端消费。与电厂相比，工业燃煤锅炉配套的除尘、脱硫、脱硝等烟气治理设施相对落后，居民生活煤炭燃烧装置基本没有配备任何污染控制设备。因此，工业与居民生活终端煤炭消费比例高，是造成中国煤烟型大气污染较为严重的重要原因之一。

1.1.4 煤炭利用与污染控制水平较低导致大气污染物排放绩效偏高

（1）煤质差，洗选加工水平低

我国煤炭资源中，褐煤和烟煤占探明资源储量的 55.1%，炼焦煤占探明资源储量的 27.6%，且优质炼焦煤资源仅占探明储量的 9%左右，贫煤和无烟煤数量仅占保有资源量的 17%（见图 1-7）。我国储量最丰富的褐煤和烟煤，发热量低，且普遍硫含量较高，硫分小于 1%的特低硫煤占探明储量的 43.5%以上，大于 4%的高硫煤为 2.28%，广西合山、四川上寺等地的煤层，硫分可高达 6%~10%以上。中国煤炭灰分普遍也较高，灰分小于 10%的特低灰煤仅占探明储量的 17%左右，大部分煤炭的灰分为 10%~30%。我国用于发电的煤炭，平均灰份在 20%~25%之间，平均硫份约为 1%，和美国用于发电的煤炭（平均灰份 9%、平均硫份 1%）相比，煤质较差，燃烧稳定性也较差。

注 2：中国数据为生活能源消费构成，美国数据为除工业和交通运输外其他终端能源（包括生活、农业和林业）消费构成。

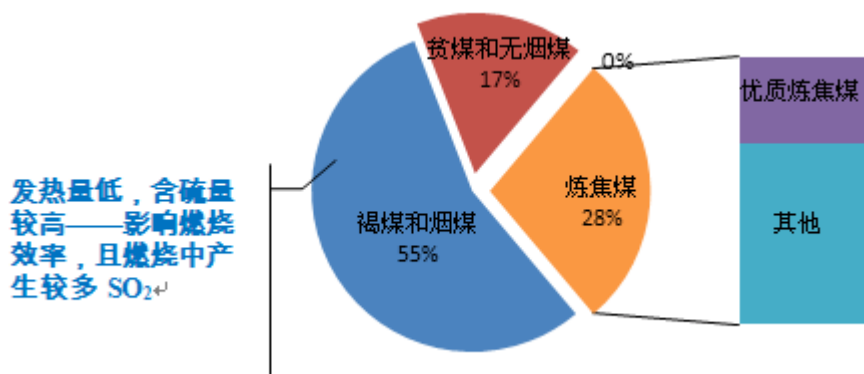


图1-7. 中国煤炭资源种类及其构成比例

(数据来源:《中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究综合研究报告》.)

煤炭洗选是提高煤炭利用效率，减少烟尘、二氧化硫、重金属等大气污染排放最为成熟和有效的技术，但目前我国煤炭洗选加工整体水平与发达国家相比仍然存在不小差距。首先是原煤入洗率低，2010年，全国原煤入洗率为50.9%，低于国外55%至95%的水平，并且除炼焦煤外，大部分动力煤未经洗选直接燃烧，不仅给煤炭运输带来巨大压力，也是造成燃煤锅炉烟尘、二氧化硫、汞等大气污染物排放水平相对较高的主要原因之一。其次，我国商品煤质量较差，高灰、高硫商品煤已成为我国用煤行业高能耗和高污染的重要因素。

原煤煤质差、洗选加工水平低，直接导致了我国较高的污染物排放水平。同时煤质的不稳定还会引起燃煤工艺的不稳定，直接影响燃煤电厂、工业锅炉等除尘器和烟气脱硫系统的性能，加大了污染治理的难度。

(2) 煤炭利用技术及污染控制水平偏低

近年来，通过实施行业准入政策，推动落后产能淘汰，我国的电厂锅炉、炼焦炉和水泥窑等在技术水平方面都发生了变化，但我国所处的发展阶段和经济结构导致我国煤炭利用水平还相对较低。

电力燃煤效率有待进一步提高。尽管我国燃煤发电机组的平均供电煤耗已由2000年的392gce/(kWh)降至2010年的333gce/(kWh)，但与国际先进水平（低于310gce/kWh）还有不小差距（见图1-8）。此外，大容量高参数锅炉比例偏低、实际燃煤煤质差且偏离设计煤质等问题依然存在，2010年电厂能源转换总效率为44%，比发达国家低10个百分点。我国火电行业的燃煤及污染物排放量依然巨大。

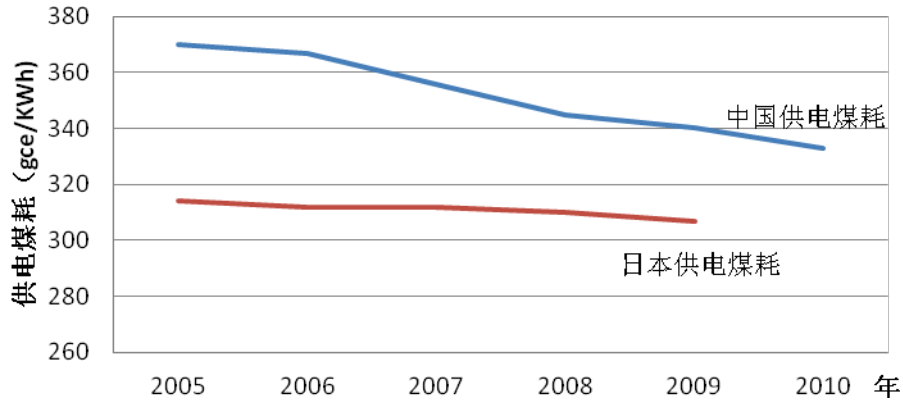


图1-8. 中国与日本火电厂供电煤耗比较

(数据来源：中国能源统计年鉴 2011 年)

燃煤炉窑利用水平低下，小型燃煤工业锅炉数量巨大。目前，全国约有燃煤工业锅炉 50 万台，燃煤锅炉实际运行热效率在 60% 左右，比先进国家低 15%~20%，小型燃煤锅炉热效率甚至不足 50%。燃煤锅炉年消耗原煤约 6.4 亿吨，煤炭消费量大、煤炭利用效率低、污染严重。此外，由于操作不当和低负荷运行等原因，我国燃煤工业锅炉在运行过程中过量空气系数往往远超过正常值。这不仅浪费了能源，还使排放的烟气中烟尘浓度升高，并且提高了烟气中由于燃烧不完全产生的黑碳（BC）和有机碳（OC）、CO 等污染物的浓度，增加了大气污染治理的难度。

在污染控制技术方面，我国大气污染控制总体水平仍然偏低。一是与日本、德国等国际先进水平相比，中国燃煤电厂在除尘、脱硫和脱硝方面依然有较大的差距，电厂脱硝设施安装比例偏低，存在很大的技术提升空间。二是我国燃煤工业锅炉量大而分散，不同地区对燃煤工业锅炉污染控制的技术和管理水平参差不齐，大多数地区燃煤锅炉污染控制存在脱硫、除尘设施整体配置不够完善，操作管理人员技术水平较低等问题。6t/h 及以下小型锅炉，大多还是采用单筒旋风除尘器或多管旋风除尘器，除尘效率低，污染物排放强度高。此外，炼焦炉的工艺流程排放缺少标准和控制规范的约束，导致行业整体控制水平较低。煤炭利用技术偏低以及污染控制方面存在的各种不足，导致我国工业行业大气污染物排放强度普遍偏高。

1.2 节能环保要求对我国煤炭消费的制约

1.2.1 环境空气质量达标要求对煤炭消费的制约

当前我国大气环境形势十分严峻，在传统煤烟型污染尚未得到控制的情况下，以细颗粒、臭氧、酸雨为特征的区域性复合型大气污染日益突出。一些城市经常出现长时间灰霾天气，空气污染对公众健康产生了严重威胁。环境保护部2012年发布的《环境空气质量标准》（GB3095-2012）中，加严了PM₁₀、NO₂浓度限值，并增加了PM_{2.5}、O₃八小时浓度限值指标。按照新修订的空气质量标准，NO₂、PM₁₀分别执行年均浓度40ug/m³、70ug/m³的二级标准，若采用老三项指标进行评价，2010年重点区域中超标城市达98个，城市超标率高达80%以上，其中PM₁₀、NO₂、SO₂超标城市分别占超标城市总数的91.8%、40.8%、5.1%；如将PM_{2.5}与8小时O₃纳入空气质量评价体系，重点区域城市空气质量达标率将不足10%。

城市环境空气质量达标的关键在于各种污染物的大幅度削减。相关研究指出，要使我国80%以上城市空气质量达到《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级标准的要求，至少要使我国二次颗粒物的气态前体物和一次颗粒物的排放量在2010年的基础上削减40%~50%。对于污染物排放集中、灰霾污染严重的华北地区，则需要更大力度的减排。如果按照“十一五”以来每五年主要污染物减排10%左右的速度，需要20年才能实现上述目标，显然无法应对当前空气质量快速恶化的严峻局面。同时，随着烟气治理技术的推广，末端治理措施的减排空间逐步压缩，如果仅依赖工程技术手段，要在煤炭消费高速增长的情况下实现各种污染物排放量削减过半的目标，几乎是不可能完成的任务，必须从能源结构和产业结构调整入手，实施区域煤炭消费总量控制，从源头上减少各种污染物的产生量，为解决区域空气污染问题创造条件。

1.2.2 不断加严的排放标准对煤炭消费的制约

燃煤电厂大气污染物排放标准最初颁布于1991年，此后，分别于1996年、2003年、2011年进行了三次修订。2011年9月颁布的《火电厂大气污染物排放标准》（GB13223-2011），提出对新建和现有燃煤电厂实施更为严格的排放标准，

还要求在重点区域实施污染物特别排放限值。历次火电厂排放标准的提高，都大大促进了火电厂污染治理技术的进步和治理设备的升级，但技术进步的潜力是有限的（见图 1-9）。在我国电力行业大气污染物，如烟尘、二氧化硫等排放控制已经普遍采用世界上最佳可行技术的前提下，仍有部分标准限值要求超出了目前的治理技术所能达到的水平，电力企业仅通过末端治理技术的升级尚不能满足排放标准的要求。

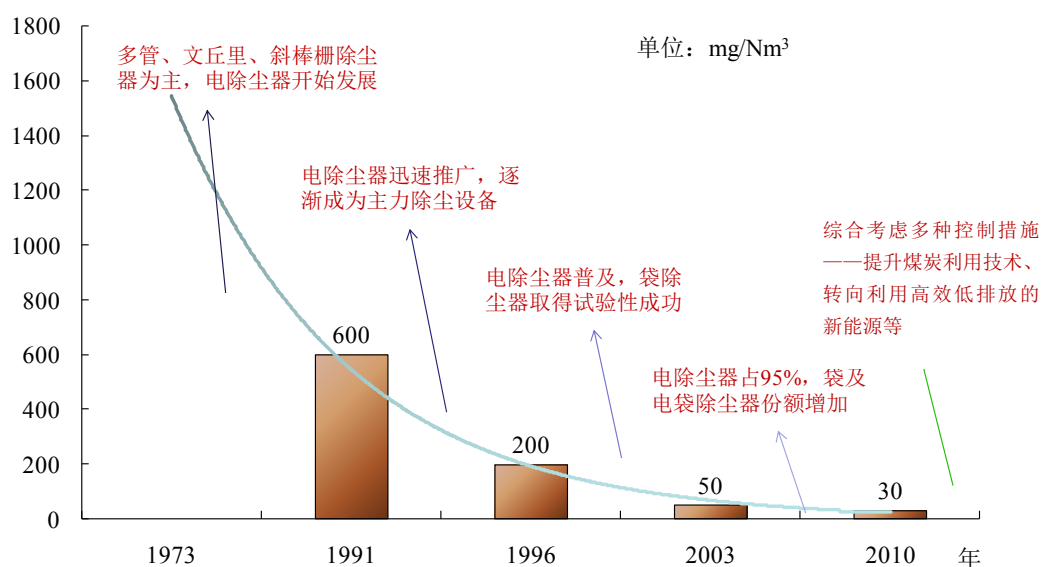


图1-9. 火电厂烟尘排放标准与除尘技术进展

“十二五”期间，我国还将颁布钢铁行业大气污染物排放标准，并计划发布新的燃煤锅炉大气污染物排放标准。这些新标准出台后，新建和现役烧结机、高炉、燃煤锅炉等排放大气污染物的浓度限值将大幅下降。其中，燃煤锅炉烟尘排放浓度限值可能会由现在的 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 降低至 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ，甚至下降至 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 。在如此严格的排放标准下，中小型燃煤锅炉（ $\leq 20\text{t}/\text{h}$ ）通过高效除尘技术改造来实现稳定达标排放，已经不具备环境与经济可行性了，必须要综合利用集中供热并网、天然气及其他清洁能源替代等各种控制措施。

可见，单纯依靠末端治理技术的提升，已越来越难以满足不断加严的污染物排放标准要求，且高效治理技术的应用会大幅增加污染治理成本，加重企业负担。高排放行业必须采用提升煤炭利用技术、转向利用高效低排放的新能源等手段，满足严格的污染物排放标准。

1.2.3 节能与应对气候变化任务对煤炭消费的制约

“十一五”期间，我国实现了单位 GDP 能耗下降 20%左右的目标，但由于 GDP 年均增速高达 11.2%，远超过规划预期的 7.5%，因此，2010 年我国能源消费总量达到 32.5 亿吨标煤，较 2005 年增加 8.9 亿吨标煤，远高于 27 亿吨标煤的规划值。由于新增能源消费主要来自煤炭消费的增长，给大气环境带来了一系列负面影响，能源消费与环境保护的矛盾突出。

由于各地“十二五”规划的经济增长率明显高于全国 7%的目标（见图 1-10），根据“十二五”规划各省能源强度下降目标（见表 1-3），预估 2015 年我国能源消费总量将达到 52.8 亿吨，将远远超过“十二五”规划 40 亿吨的预期目标值。要想完成节能任务，实现“十二五”能源消费总量规划目标，仅依靠单位 GDP 能耗下降目标是远远不够的，必须实施能源消费总量控制，转变能源消费结构。

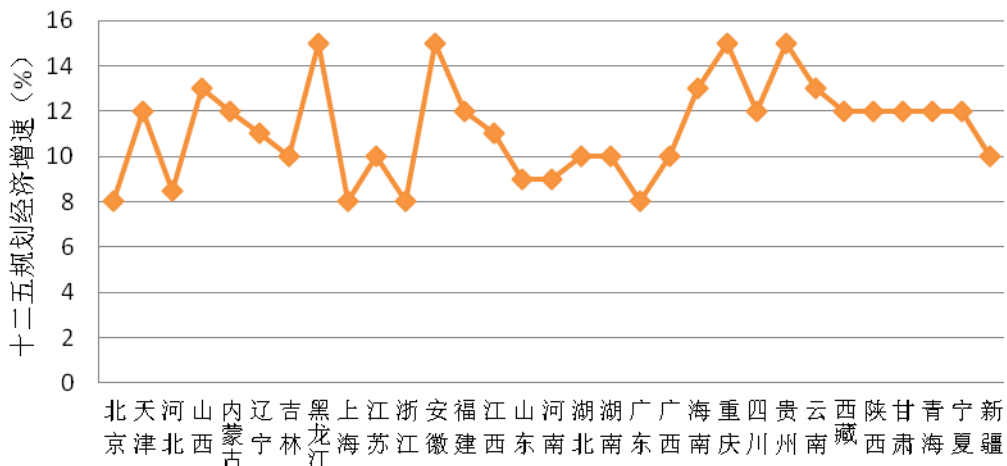


图1-10. 各省“十二五”规划经济增速

（数据来源：http://cn.chinagate.cn/reports/node_2364474_2.htm）

表1-3. “十二五”规划各省能源强度下降指标

类别	第一	第二	第三	第四	第五
(%)	18	17	16	15	10
地区	上海、天津、江苏、浙江、广东	北京、河北、山东、辽宁	山西、吉林、黑龙江、安徽、福建、江西、河南、湖北、湖南、重庆、四川、陕西	内蒙古、广西、贵州、云南、甘肃、宁夏	海南、西藏、青海、新疆

数据来源：http://cn.chinagate.cn/economics/zgsew/2011-03/16/content_22152638.htm.

随着国民经济发展和工业化城镇化的快速推进，今后较长一段时期，我国的能源需求还将较快增长，以煤炭消费为主的能源结构，导致我国温室气体排放量还将持续增长。面对国际社会要求控制温室气体排放的呼声，我国已在哥本哈根气候会议上承诺“到 2020 年单位国内生产总值（GDP）二氧化碳排放比 2005 年下降 40~45%”的温室气体减排目标。由于煤炭燃烧是二氧化碳排放最主要的来源，因此艰巨的应对气候变化任务，将对我国煤炭消费产生制约，对我国以煤为主的一次能源消费结构，及粗放的煤炭利用方式提出严峻挑战。

1.3 实施煤炭消费总量控制势在必行

综上所述可见，煤炭消费与大气环境保护之间构成双向约束关系。

一方面，煤炭消费的总量、分布、结构及技术水平等因素均对我国大气环境造成严重的影响，制约城市与区域空气质量的改善。首先，煤炭消费增长迅速导致巨大的污染物排放负荷，使我国 SO₂、NO_x 排放量位居世界首位，大气污染物排放远远超出环境承载能力；其次，煤炭消费空间分布不平衡引发区域性复合型大气环境问题，突出表现为以三区十群为代表的重点区域单位面积煤炭消费量是全国平均水平的 4 倍左右，由于污染物排放密集，加之上述地区多为经济发达、人口密集的区域，机动车保有量迅速，重化工业快速发展，从而导致各种污染物相互作用、耦合并远距离传输，以 PM_{2.5}、O₃、酸雨为特征的区域复合型污染呈加剧态势；第三，煤炭消费结构不合理加剧了城市煤烟型污染，目前我国电力行业煤炭消费量仅占全国煤炭消费总量的 50%左右，远低于美国 90%的水平，大量的煤炭消费集中于工业锅炉、烧结机和建材窑炉，复杂的排放源构成使得我国成为全球大气污染控制体系最为庞大、构成最为复杂、减排难度最大的国家，在一定程度上也加剧了城市煤烟型污染；最后，煤炭利用与污染控制技术水平较低导致污染物排放绩效偏高，典型表现为原煤煤质差、入洗率低，原煤平均入洗率仅为 50%，低于发达国家 55%-90%的水平，电厂锅炉与燃煤炉窑煤炭利用与污染控制技术水平低，导致煤炭利用率低、污染物排放强度大，相比于发达国家，燃煤污染物排放绩效有较大的提升空间。

另一方面，不断提高的大气环境保护要求对煤炭消费模式又构成反向约束关

系。作为煤炭消费作用于大气环境的响应机制的反馈机制，近年来大气环境保护对煤炭消费活动的反向约束作用越来越突出，已成为影响我国煤炭消费模式的主要制约因素。分析表明大气环境保护对煤炭消费的反向约束作用主要根源于四个方面：一是公众对环境空气质量改善的迫切要求，基于当前大气环境形势对公众健康造成的严重影响，国家修订了环境空气质量标准，不仅加严了传统 3 项一次污染因子的限值，而且增加了 PM_{2.5} 与 O₃ 等二次污染因子的控制要求，而欧美空气质量达标的经验表明，要控制 PM_{2.5} 等二次污染因子，需要在 SO₂、NO₂ 已经达标的基础上继续推进 SO₂、NO_x 减排，这无疑增加了城市达标的难度，也对煤炭消费构成刚性约束；二是电力、燃煤锅炉、钢铁等主要耗煤行业污染物排放标准不断加严的迫切要求，在此情况下，单靠末端治理技术的提升，不仅难以实现稳定达标排放，而且高效治理技术的应用还会增加企业治污成本，必须转向采取高效煤炭利用技术、使用低排放的可再生能源等手段；三是节能与应对全球气候变化的迫切要求，“十二五”国家提出合理控制能源消费总量的导向性要求，并提出到“十二五”末全国能源消费总量控制在 40 亿吨标准煤的预期性目标，然而由于地方过度追求经济增长速率，仅凭借万元 GDP 能源消耗强度下降的约束，是无法实现合理能源消费总量控制的目标，因此为实现节约能源、缓解资源约束、应对气候变化、保障能源和经济安全的战略目标，必须实施以煤炭为主的能源消费总量刚性控制政策。

基于我国现阶段煤炭消费与大气环境保护的双向约束关系，为实现二者的协调发展、改善城市与区域环境空气质量、促进煤炭合理消费，实施煤炭消费控制势在必行。

第2章 燃煤大气污染控制的国际经验

人类使用煤炭作为能源已有上千年的历史。煤炭作为人类利用时间最长的商业能源品种，在人类文明发展，尤其是工业发展的过程中起到了举足轻重的作用。18 世纪工业革命后，蒸汽机成为生产的主要动力，带动了工业化国家煤炭使用量的大幅增长；19 世纪后期发电机和电能推广后，燃煤发电成为了全球最主要的发电方式，煤炭的使用量进一步飞速增长。煤炭的使用造成了 SO₂、NO_x、PM 等大气污染物的大量排放，从国际经验来看，在发达国家大气污染物排放控制的历程中，煤炭使用过程中的污染排放控制都曾经是非常重要的部分；随着天然气、可再生能源、核能等更加清洁的能源品种不断发展与成熟，发达国家的煤炭消费量在其能源中的比例不断下降，为其实现大气污染物排放量削减目标，改善环境空气质量起到了重要作用。

2.1 发达国家煤炭消费量的变化趋势

煤炭作为“工业的粮食”，在现代国家的工业化过程中起着非常重要的作用。根据用途，煤炭可分为动力煤和炼焦煤两大类。其中动力煤主要用于给电厂锅炉、工业锅炉等提供热源，炼焦煤主要用于焦炭的生产，是炼铁过程的主要生产原料。在动力煤方面，随着天然气、水力及核能等发电技术的发展，电力供应对于煤炭的依赖度有所下降，这造成了一些发达国家用于发电的煤炭消费量逐步降低，尤其是一些欧洲国家；天然气等优质、高效、清洁能源的发展推动了煤炭逐渐退出工业锅炉等设备的能源供给市场。在炼焦煤方面，由于欧美发达国家的工业化已经完成，主要的钢铁生产都是使用废钢，应用短流程技术进行冶炼，使得焦炭的需求量大幅降低。以上几方面的综合作用使得发达国家的煤炭消费量增长趋势在上世纪中叶以后逐渐放缓。

根据部分发达国家近半个世纪以来的煤炭消费量变化趋势（BP，2011），以德国、英国为代表的欧盟国家的煤炭消费量在 1965 年以后保持长期的下降趋势，（如图 2-1 所示）。从煤炭占全社会商品能源消费量的比值来看（如图 2-2 所示），

以德国、英国为代表的欧盟国家的能源结构在近半个世纪以来有了显著变化。以德国和英国为例，其煤炭在全社会商品能源中的比重从近 2/3 降低至不到 1/4，欧盟国家的煤炭在全社会商品能源中的比重也从 50%降低至约 15%。欧洲国家煤炭消费量的显著降低主要得益于几点，一是清洁能源、新能源和可再生能源技术的高速发展，使得社会可选择这些能源替代煤炭；二是工业化基本完成，高能耗、尤其是高煤耗的冶金、建材等重工业行业的能源需求量逐年降低；三是社会能耗高速发展的阶段基本结束，加上能源利用效率的逐年提高，使得总能耗保持在一个比较稳定的范围。煤炭使用量的降低在很大程度上促进了欧洲国家大气污染物排放量的削减，改善了欧洲的空气质量。

与欧洲国家的煤炭消费量下降趋势相对，美国、加拿大和日本等国家的煤炭消费量则处于增长态势，其煤炭占全社会商品能源消费量的比值也未见有明显降低的趋势。其中，美国总能耗中煤炭的比例在 70 年代后期到 80 年代中期升高后一直保持在 25% 上下；日本总能耗中煤炭的比例在 70 年代后期石油危机以前降至最低值，然后恢复至 20% 左右，并在本世纪初上升至 25% 左右；加拿大的煤炭使用量虽然有所增加，但占其总商品能源的比重一直维持在 10% 左右。日本煤炭使用量的增加主要是源自于其经济长期快速的的增长，而美国煤炭使用量的增加和美国以燃煤电厂为主的发电结构有很大关系。

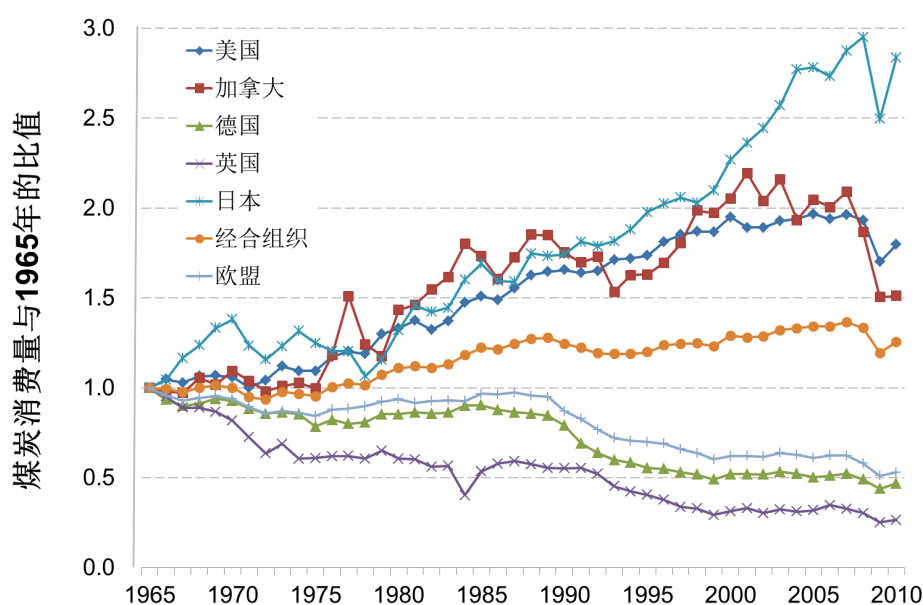


图 2-1. 欧美等地区发达国家的煤炭消费量变化趋势（1965 年~2010 年）
（数据来源：BP, 2011. 2011 年 BP 世界能源统计年鉴.）

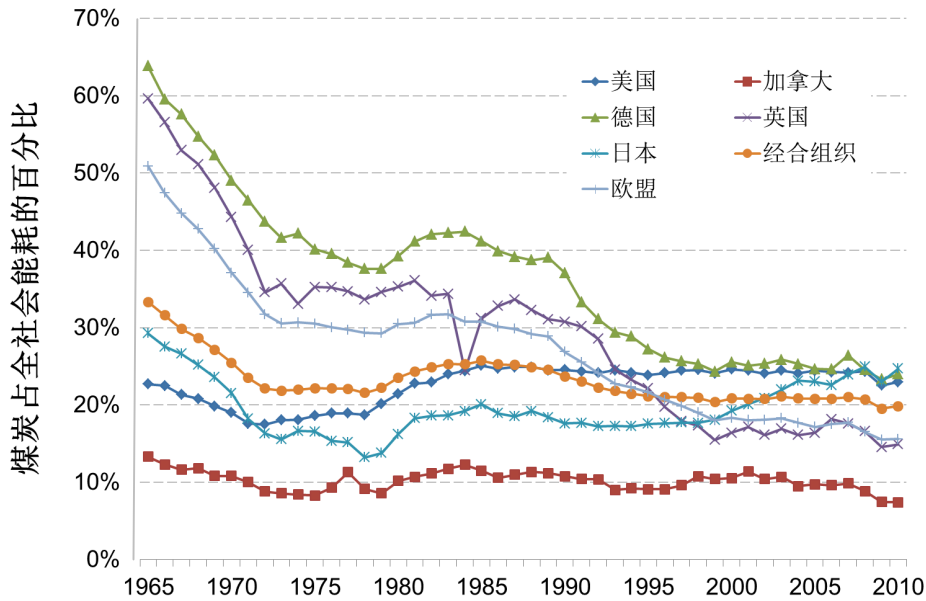


图 2-2. 欧美等地区发达国家的煤炭占全社会商品能源消费量的比值 (1965 年~2010 年)
(数据来源: BP, 2011. 2011 年 BP 世界能源统计年鉴.)

2.2 欧洲的煤炭消费总量削减与大气污染控制

2.2.1 欧洲跨界大气污染控制与煤炭消费量的削减

在 20 世纪 60 年代, 欧洲的科学家通过研究, 论证了欧洲大陆的 SO_2 排放是导致斯堪的纳维亚众多湖泊的酸化的重要原因, 这是欧洲最早的跨界大气污染传输研究成果。在此基础上, 1972 年联合国于斯德哥尔摩召开了第一届酸雨大会, 标志着人类开始通过国际合作应对酸沉降污染问题。在 1972 年到 1977 年间, 多项研究证实了大气污染物可以传输至数千公里外, 对当地的人群和生态产生危害, 这些研究结果进一步增强了欧洲各国通过国际合作, 共同应对酸雨等越境空气污染问题的意愿。

为了应对严峻的大气污染物跨界传输问题, 欧洲经济委员会 (United Nations Economic Commission for Europe, UNECE) 于 1979 年 11 月在日内瓦召开了其框架下的以环境保护为主题的部长级会议。在该会议上, 34 个欧洲国家政府和欧洲共同体共同签署了《长距离越境空气污染公约》(Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, LRTAP)。这个公约是人类历史上第一个在区域基础上应对大气污染问题的, 具有法律约束力的国际文书。除了规定大气污染防治的

基本国际合作原则之外，公约还建立了一套制度框架，用于将科学研究的最新结果和和政策制定过程紧密结合。

《长距离越境空气污染公约》于 1983 年开始生效，自此以后，它作为欧洲大气污染防治的最主要的纲领性文件，长期稳定地发挥了作用，使得欧洲不同政治体系的国家都在一个统一的框架下制定和执行大气污染防治规划。至今为止，在此公约的基础上，欧洲各国进一步签订了 8 个议定书，为欧洲制定统一的大气污染防治规划奠定了坚实基础。其中，与燃煤污染控制紧密相关的 SO₂、NO_x 控制的议定书分别于 1990 年前后签署，如表 2-1 所示。

表 2-1. 在《长距离越境空气污染公约》基础上扩展的 8 个议定书

议定书主题	参与主体数量	签署时间	生效时间
长期资助联合监测和评估计划	43	1984	1988
降低 SO₂ 排放和跨境传输量至少 30%	25	1985	1987
控制 NO_x 及其跨境传输量	34	1988	1991
控制挥发性有机物及其跨境传输量	24	1991	1997
进一步降低 SO₂ 排放量	29	1994	1998
控制重金属	30	1998	2003
控制持久性有机污染物	30	1998	2003
降低酸化、富营养化和地面臭氧	26	1999	2005

由于煤炭燃烧是 SO₂ 和 NO_x 的重要来源，减少煤炭使用量成为了欧洲国家降低自身 SO₂ 和 NO_x 排放量，达到控制目标的重要途径。欧洲煤炭消费总量的历史趋势（图 2-3）显示，欧洲控制 SO₂ 和 NO_x 排放的议定书签署并开始生效的上世纪 80 年代末至 90 年代也正好是整个欧洲煤炭消费量开始出现下降的时段，自此以后的 10 多年间，整个欧洲的煤炭消费量减少了约 40%。虽然“降低 SO₂ 排放和跨境传输量至少 30%”、“控制 NO_x 及其跨境传输量”和“进一步降低 SO₂ 排放量”这 3 个议定书中并未对煤炭消费量的控制提出明确要求，但欧洲国家纷纷将削减煤炭消费量作为降低 SO₂ 和 NO_x 排放的重要手段。事实证明，这一手段显著削减了欧洲煤炭消费过程中的 SO₂ 和 NO_x 的排放，为

欧洲国家成功控制酸雨污染作出了贡献。

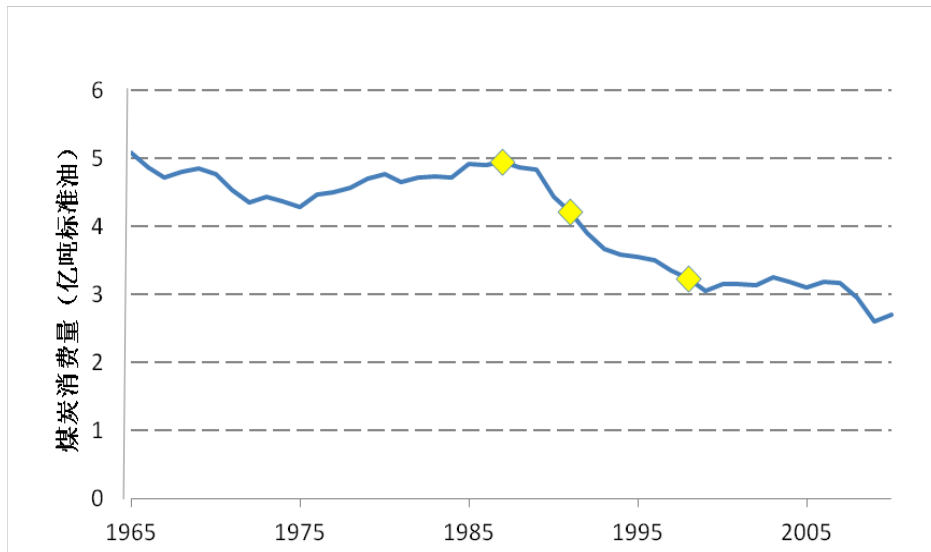


图 2-3. 1965~2010 年欧洲煤炭消费量

(数据来源: BP, 2011. 2011 年 BP 世界能源统计年鉴.)

2.2.2 英国煤炭消费量的削减与大气污染物排放量的削减

1952 年的伦敦烟雾事件引起了英国民众和政府的深刻关注, 人们开始意识到控制大气污染的重要意义。在此影响下, 英国于 1956 年通过了《洁净空气法案》。此后, 随着《洁净空气法案》的实施, 英国的民用和工业用煤逐渐减少。英国《洁净空气法案》的实施分为三个阶段: 第一阶段(1956—1970)中, 燃煤仍然是英国最重要的能源, 政策主要针对燃煤过程中的污染治理。《洁净空气法案》规定了硬性的煤炭燃烧标准, 促进了煤炭的充分燃烧, 降低了燃煤过程中产生的大气污染物。与此同时, 清洁能源的使用也得到了大力推广。第二阶段(上世纪 70 年代—上世纪 80 年代)中, 英国的产业结构得到了调整, 石油和天然气得到广泛使用, 煤炭使用量大幅度降低, 烟尘、SO₂、NO_x 等大气污染物得到了有效的控制(图 2-4)。第三阶段(上世纪 90 年代—至今)中, 伴随着整个欧洲大气污染控制的进程, 煤炭消费量进一步明显降低, 大气污染物的主要控制对象逐渐向移动源转移。

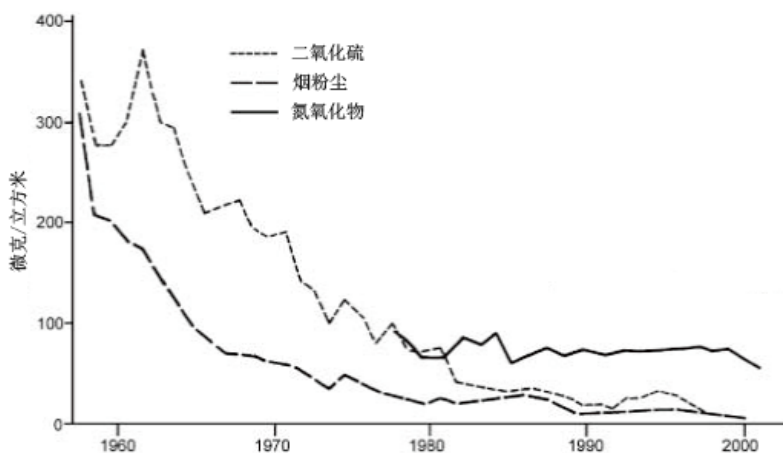
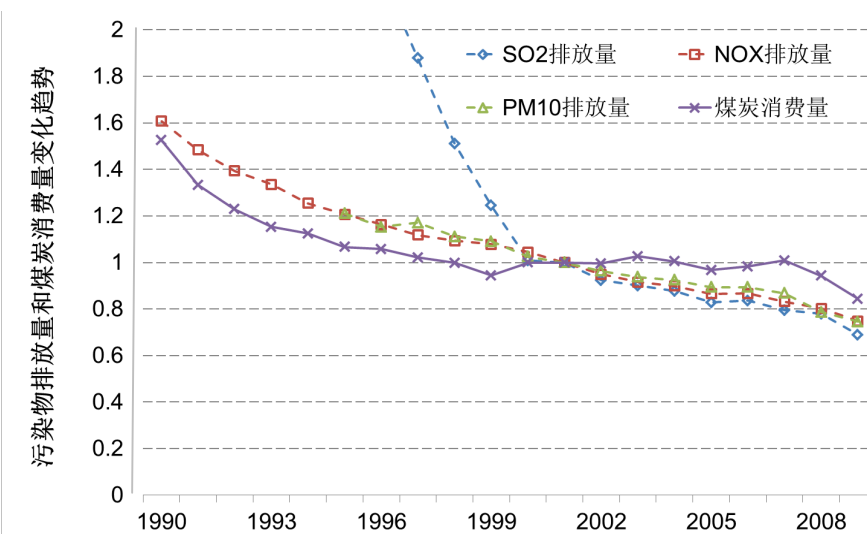


图 2-4. 伦敦 SO₂、烟粉尘、NO_x 大气环境浓度变化趋势

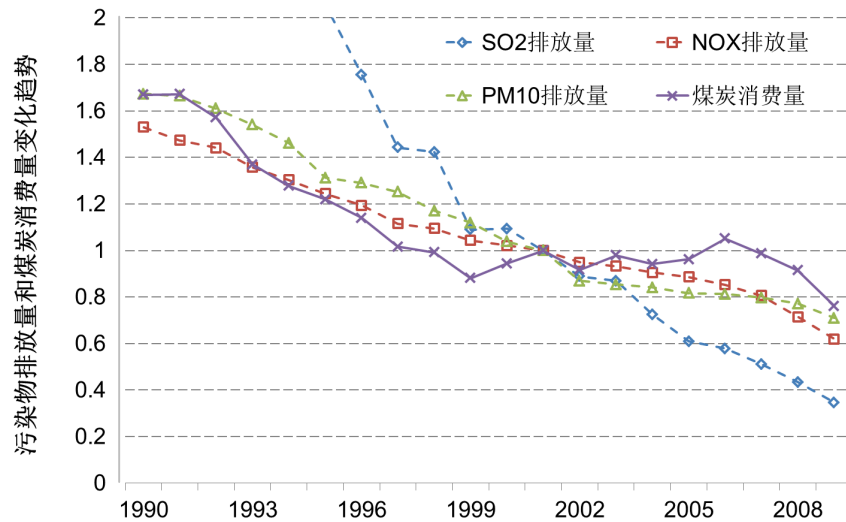
(修改自 P. Brimblecombe 2006.)

2. 2. 3 欧洲煤炭消费量削减对大气污染物减排的贡献

近 20 年来，欧美发达国家通过实施严格的污染物控制措施，大气污染物的排放量有了显著下降。如图 2-5 所示，在以德国和英国为代表的欧洲国家，NO_x 和 PM 的排放量下降趋势与煤炭消费量总体保持一致，而 SO₂ 的排放量则在 2000 年前有更为明显的下降，这主要是通过实施更加严格的燃煤电厂排放标准，以及普遍安装烟气脱硫装置实现的。从欧洲的经验可以看出，煤炭消费总量和 SO₂、NO_x、PM 等主要大气污染物的排放量一致下降的趋势说明了降低煤炭消费量可以有效地降低大气污染物的排放量。



(a) 德国



(b) 英国

图 2-5. 德国(a)和英国(b)的煤炭消费量与主要大气污染物排放量

(数据来源：煤炭消费量：BP, 2011. 2011 年 BP 世界能源统计年鉴；
大气污染物排放量：EMEP emission data.)

2.3 美国的煤炭消费部门分布与大气污染控制

2.3.1 美国煤炭消费量的部门分布

美国的煤炭消费量在近半个世纪以来增长了约 1 倍，与此同时，其煤炭的使用结构也有了很大程度的变化（如图 2-6 所示）。在上世纪中叶，工业是最大的煤炭消费部门，其煤炭消费量超过全美国的 40%，其中用于炼焦的煤炭一度超过全美国煤炭消费量的 20%；而用于发电的煤炭不到全美国煤炭消费量的 20%；其他的煤炭分散用于民用、商业和交通等部门。到 2010 年，美国用于工业的煤炭量在 1950 年基础上减少了 2/3，其中用于炼焦的煤炭减少了 3/4；民用煤炭消费减少了 99%，商业部门的煤炭消费减少了 95%，用于交通部门的煤炭消费设备（如蒸汽机车）已经全部淘汰。与此同时，用于电力部门的煤炭消费量增长了超过 10 倍，这使得美国电力部门的燃煤消费量在全社会的煤炭消费量比例在 2010 年超过了 93%。

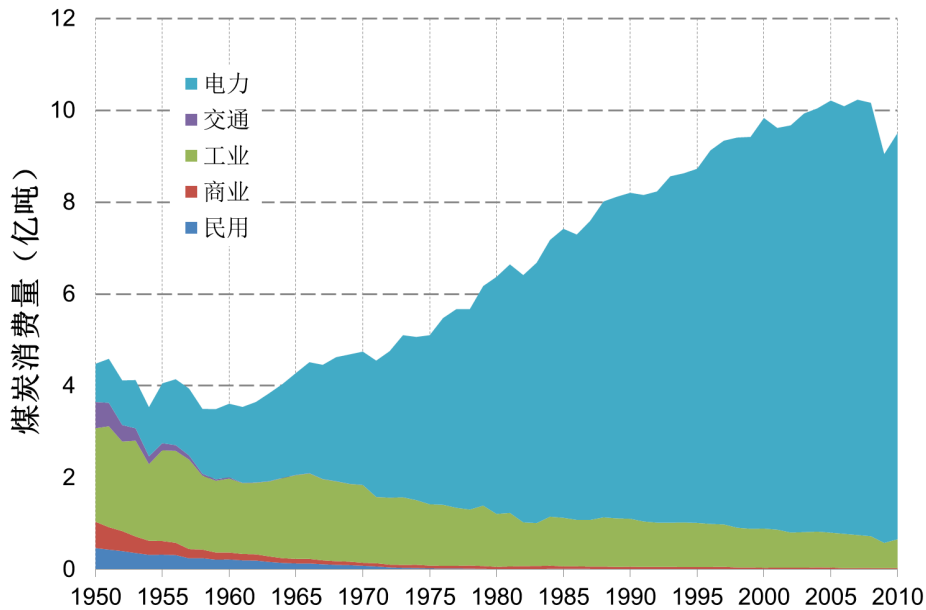


图 2-6. 美国分部门煤炭消费量（1950 年~2010 年）

（数据来源：U.S. EIA, 2011. U.S. Coal Consumption by sector.）

2.3.2 美国煤炭消费过程的大气污染物排放水平

虽然美国的煤炭消费量在过去 50 年间维持着增长的势头，但煤炭消费过程中的大气污染物排放量却在上世纪 80 年代以后开始下降。在所有直接排放的大气污染物中，SO₂ 排放量的绝大部分来自煤炭燃烧，因此可以将 SO₂ 作为代表性的大气污染物，分析美国煤炭消费过程中大气污染物排放水平变化的历史趋势。根据 1970~2010 年美国电力部门和工业部门的 SO₂ 平均排放系数（图 2-7）可以发现，在 1970 年以前，由于没有任何 SO₂ 排放控制措施，电力部门和工业锅炉的 SO₂ 排放系数都保持在 50kg/t 煤以上，此后电力部门和工业锅炉的 SO₂ 排放系数显示出不同的下降轨迹。其中，电力部门的 SO₂ 排放系数保持着明显的持续下降，40 年间共降低了 90%；而工业锅炉的 SO₂ 排放系数在 20 世纪后期一直稳定在 40~50kg/t 煤之间，2000 年后，虽然下降到 30kg/t 煤左右，但总体水平仍然比电力部门的排放系数高出 3~5 倍。

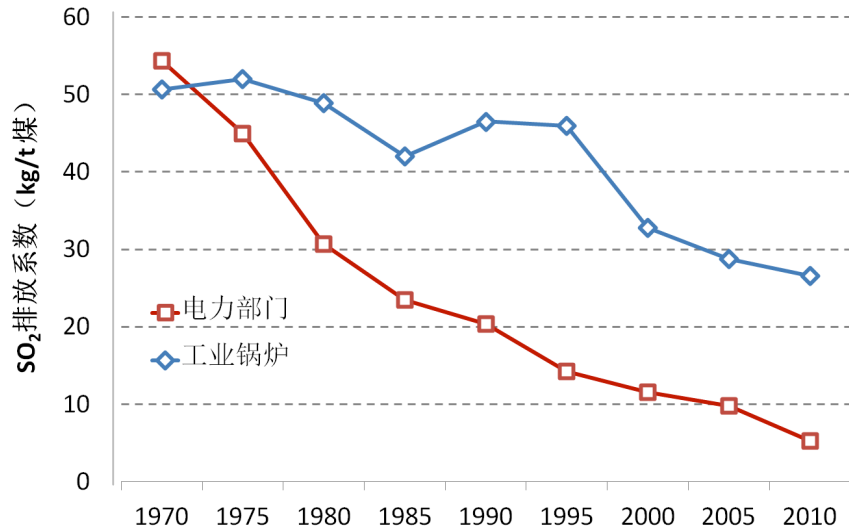


图 2-7. 美国电力和工业部门（除炼焦外）煤炭消费的 SO₂ 排放系数

结合美国煤炭消费量部门分布的变化和各部门 SO₂ 排放系数的变化情况可以发现，虽然美国的煤炭消费总量在过去 50 年以来持续上升，但是其煤炭消费的增量主要集中在大气污染物排放控制水平相对较高的电力部门，同时由于电力部门大气污染物控制水平提高的速度高于煤炭消费量增长的速度，其大气污染物排放总量保持持续下降；工业锅炉的大气污染物排放量也保持下降的趋势，这一方面得益于工业锅炉大气污染控制水平的提高，但是更主要的是由于工业锅炉煤炭消费量的大幅下降。不同部门在煤炭消费结构中的比例变化大大促进了美国的 SO₂ 排放控制。从 1970 到 2010 年，美国电力部门和工业部门(除炼焦外)的煤炭消费量比值从 3.6:1 上升到了 20.1:1。在 2010 年的污染控制水平下，假如煤炭消费的部门结构维持在 1970 年的水平，则美国的 SO₂ 排放量将增加 308 万吨，相当于美国当年 SO₂ 排放量的 43%。

2.3.3 美国大气污染控制政策对煤炭消费结构的影响

美国的大气污染控制政策都依据于《清洁空气法(Clean Air Act)》。《清洁空气法》于 1970 年由国会通过，授权美国环保局制定《国家环境空气质量标准》，并要求美国各州采取立法的形式使空气质量达到 NAAQS。在美国基于《清洁空气法》制订的大气污染管理框架下，空气质量达标是最终目的，而当前的空气质量是否达标也是各个区域实施大气污染控制措施的基本判据。达标区和未达标区

的主要管制区别是新排放源的许可及既有排放源管理的不同。对于新排放源，达标区执行较为严格的许可要求；而未达标区执行最严格的许可要求。在达标区，为了维持达标水平，新排放源在技术上必须是最佳可用控制技术(best available control technology, BACT)；而对于未标地区要想取得建设前许可证必须采用可用最低排放率技术(lowest achievable emission rate, LAER)。

由于各州对于自身辖区内的空气质量达标负有法律责任，各州及其未达标区域倾向于选择总体来说污染控制成本较低的控制措施和技术，来削减煤炭使用过程中大气污染物排放量。总体而言，电力部门的燃煤锅炉由于煤炭使用集中、工况稳定、管理水平较高，大气污染物排放的单位成本相对较低，因此在 1970 年《清洁空气法》颁布实施以后，电力部门的污染物控制水平开始不断提高；而与此同时，在《清洁空气法》框架下开始实施的排污许可证等一系列政策开始要求不达标区域内的各个企业对大气污染物排放量进行削减，并要求新建企业使用高成本的最低排放率技术，这些都推高了工业部门的大气污染物控制成本。电力部门和工业部门大气污染物控制成本的差异促使工业企业降低自身的煤炭消费量，企业逐渐开始使用电力部门提供的热力补充自身的热力需求，或者调整自身结构，减少煤炭消费强度高的生产环节。这些都促使工业部门煤炭消费量降低，而这些降低的煤炭消费量有一部分转移到了污染控制水平更高的电力部门。

1990 年 11 月，在布什总统的推动下，美国国会通过了《清洁空气法修正案(Clean Air Act Amendment)》。《清洁空气法修正案》涵盖了从污染物排放标准到酸沉降控制等 6 个部分，并授权美国环保局通过实施基于市场机制的大气污染物控制政策，全面削减造成区域型污染（如酸雨、PM_{2.5}、O₃ 等）的大气污染物排放。此后的 20 年间，美国通过实施总量控制和排污交易制度，极大地促进了电厂和大型工业锅炉的 SO₂ 和 NO_x 减排。

在美国的总量控制和排污交易制度中，针对纳入交易计划的所有机组，制订了 SO₂ 和 NO_x 排放量控制目标。每个机组可以自由选择任何技术手段，包括改用天然气、使用低硫煤、对锅炉进行技术改造、使用烟气脱硫和/或烟气脱硝技术等，来达到控制目标，或者选择在排污交易市场上购买排放量配额，用于增加

自身的排放许可。这个政策机制有助于鼓励减排成本较高的工业锅炉以及小型燃煤机组淘汰，或者选用天然气等清洁能源；从而使煤炭消费更加向规模较大、减排技术成本较低的大型电厂机组集中，进一步促使美国煤炭消费结构向电力部门倾斜。

2007年，美国最高法院根据《清洁空气法》确定CO₂为大气污染物，授权美国环保局对其进行排放管制。2012年，美国环保局公布了新建电厂CO₂排放标准的草案，要求新电厂每1000kwh发电量的CO₂排放量低于450kg。对于这一排放标准，目前尚没有成熟且经济可行的技术，使燃煤电厂达标，因此，此标准的出台将使美国电力部门的煤炭消费量逐渐减少。此外，美国近2年来页岩气的大量开发和使用也将对煤炭的使用造成冲击，可以预见，美国的煤炭消费量将在近年停止增长，并开始逐年下降。

2.4 日本煤炭消费技术进步与大气污染控制

2.4.1 日本能源和煤炭消费结构的变化趋势

二战以后，日本经济高速发展，能源消费量迅速提高。煤炭作为主要的工业能源，对日本经济的发展提供了重要支撑，同时，日本各地的以煤烟和二氧化硫为代表的大气污染问题相继显现。经济高速发展的1955~1965年间是日本大气污染最为严重的时期，其间呼吸道疾病患者数量显著增长，能见度明显下降，某些地区白天的可视距离甚至缩小到30~50米。为应对严重的大气污染，日本政府于1968年通过了《大气污染防治法》，此后虽然煤炭消费总量仍然保持增长，但是其在全社会能源消费中的比例开始明显下降，从1967年到1978年的12年间，煤炭在日本能源消费中的百分比从27.7%下降到13.3%（如图2-8所示）。上世纪70年代后期开始，由于石油危机的影响，日本的石油消费量开始保持稳定，造成煤炭在全社会能源消费量中的比例有所增长，但是由于天然气、核能等能源品种的发展，煤炭在全社会能源消费量中的比例维持在20%左右。

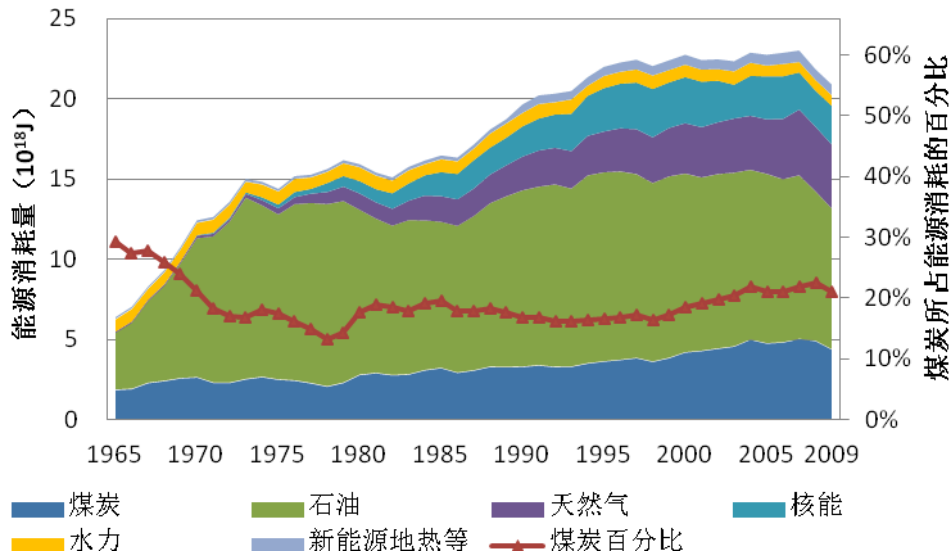


图 2-8. 日本二战后能源结构的变化

（资料：日本资源能源厅，根据《综合能源统计》编辑。）

从上世纪 70 年代后期开始，日本的煤炭消费量一直保持稳定的增长，在 30 年的时间里增长了 1.2 亿吨。从煤炭的部门分布上看，钢铁和电力是日本最主要的煤炭使用部门，占据了日本煤炭消费量的 60%~90%。从上世纪 70 年代后期开始，包括钢铁、陶瓷粘土、焦炭生产的工业行业煤炭消费量保持相对稳定；煤炭消费的增量主要集中在电力部门，从 1977 年的 0.08 亿吨增长到 2007 年的 0.87 亿吨（如图 2-9 所示）。

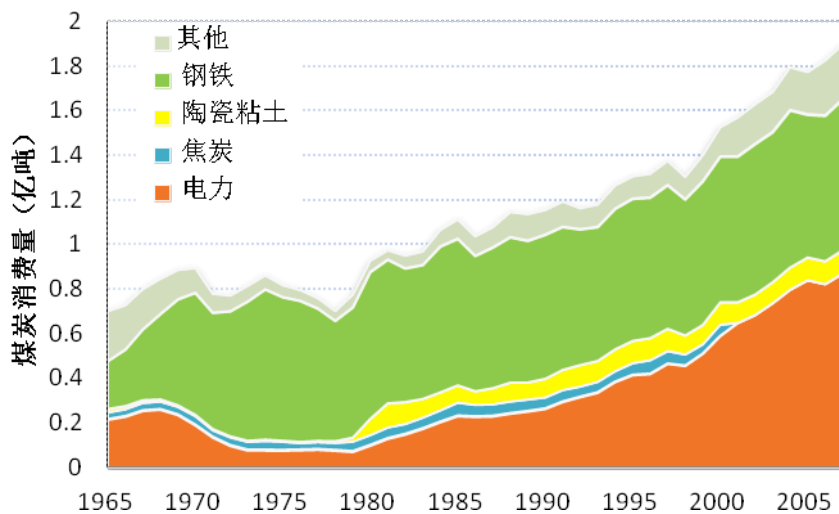


图 2-9. 日本各大主要产业的煤炭使用量变化

（资料：日本能源经济研究《能源经济统计要览 2009 年版》。）

2.4.2 日本大气环境政策和空气质量的变化趋势

针对严重的 SO₂ 污染，日本政府从 1963 年开始采取对策，先后实行浓度控制、K 值控制和总量控制等方法，到 1979 年前后，基本解决了这一污染问题。

1962 年，日本通过了《煤烟控制法》，规定了 SO₂ 排放浓度标准，此标准只针对指定地区内的指定设施，未能有效地遏止 SO₂ 污染。1968 年，日本通过了《大气污染防治法》，扩大了 SO₂ 污染控制地区的范围，制定了对污染源排放量进行严格控制的 K 值标准，SO₂ 从浓度控制转向排放量控制；针对不同地区，K 值分为 16 个等级，几乎每年一次修正减小 K 值，同时增加实行 K 值控制的区域。K 值控制虽然能控制每个污染源的排放量，但不能全面有效地控制一个地区的排放总量；此外，K 值控制法促使大工厂建设高烟囱，虽然降低了排放源附近地面 SO₂ 的浓度，但未减少排放量，反而扩大了污染范围。

1974 年 6 月，日本在《大气污染防治法》中引入了总量控制策略，实行地区排放总量和大型点源（燃料使用量大于一定值的排放源）排放总量控制，按大气容量进行排放削减的优化分配，使 SO₂ 的环境浓度逐年下降。在严格的排放量控制下，日本的 SO₂ 地面年平均浓度值从 1968 年的 0.055ppm 下降到 1988 年的 0.010ppm；1980 年地面年平均 SO₂ 浓度达标率已经达到了 98.4%，1988 年达标率达到 99.7%。此后，日本于 1981 年针对 NO_x 提出了排放总量控制，并于 1993 年制定了环境基本法，于 1998 年制定了地球气候变化对策推进法（如图 2-10 所示）。这些法律的出台都对煤炭使用过程中大气污染物排放控制提出了更高的要求，促进了 NO_x、PM 等污染物环境浓度的降低，改善了大气环境质量。

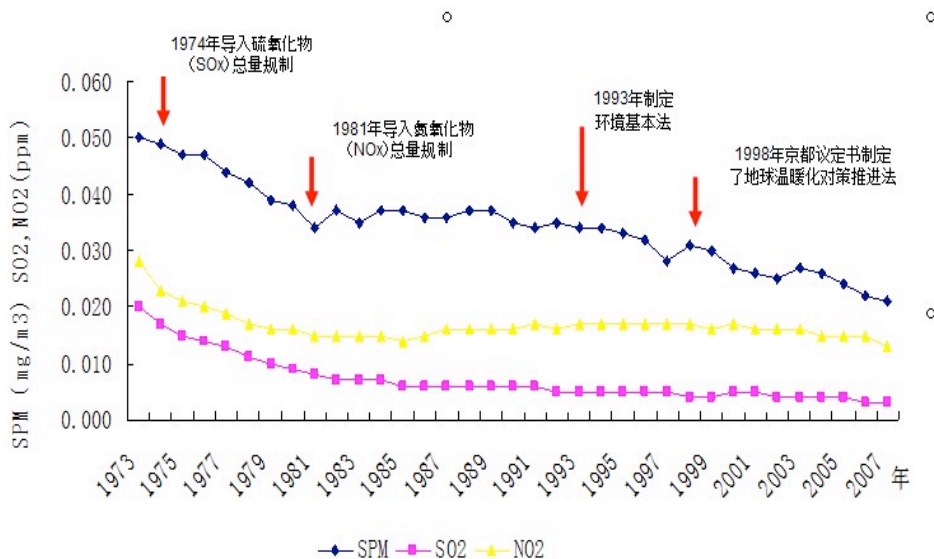


图 2-10. 日本上世纪 70 年代后主要大气污染物的平均环境浓度

(资料：日本环境省，根据《环境统计集》编辑.)

2.4.3 技术进步在日本大气污染控制中的作用

为了达到大气污染控制要求，日本一直致力于大气污染防治技术的开发和应用，以烟气脱硫为代表的燃煤大气污染控制技术在日本的大气污染控制中起到了非常关键的作用。

日本早在 1960 年就开始研发烟气脱硫技术，技术总体分为湿法、干法以及半干法 3 类。在 1966 年，日本研发出脱硫率达 90% 的干法脱硫技术，从 1974 年开始，与《大气污染防治法》推出的时间同步，日本的燃煤企业开始大规模普及脱硫技术，以湿法的“石灰石—石膏法”为主。1980 年后，“石灰石—石膏法”成为了燃煤发电厂烟气脱硫的主流技术，在日本得以大量推广。

日本的烟气脱硫技术在研发和应用上都领先于欧洲和美国。从应用的时间上来讲，以“石灰石—石膏法”为主流的湿法烟气脱硫技术从上世纪 70 年代开始就在日本的燃煤电厂上进行推广，而在美国和欧洲，由于大气污染控制政策的要求相对宽松，这一技术直到上世纪 80 年代后期才开始得到推广和应用。

2.5 发达国家经验的启示

煤炭作为推动人类工业化的能源品种，在现代国家的工业化过程和人类生活

品质提高的过程中起着非常重要的作用。欧美、日本等发达国家近半个世纪以来的燃煤污染控制历程以及煤炭消费特征变化的趋势表明，为了减少煤炭使用过程中的大气污染物排放，可以综合采用降低煤炭消费量、优化煤炭使用结构、应用先进污染控制技术等诸多手段。欧洲、美国和日本根据自身的特点，在综合使用这些手段的基础上，分别对**总量、结构和技术**有所侧重，均实现了大气污染物排放量的大幅削减和空气质量的改善。

日本由于其能源资源主要依赖外部供给，清洁能源的来源和产业结构的发展都受到诸多限制，更加侧重于通过**发展和应用先进的大气污染控制技术**实现污染物排放量的削减，这也是我国在目前的燃煤污染控制中采取的主要手段。然而随着大气污染控制设施的**安装比例逐年升高**，进一步通过**安装大气污染控制设施**的潜力逐渐减小，必须开始强调从煤炭消费总量和使用结构入手，以实现**对煤炭使用过程中大气污染物排放量的持续削减**。

从控制煤炭消费总量的角度来看，随着工业化基本完成，有替代能源的进入后工业化时代的国家可通过引入**清洁能源，大幅降低煤炭消费量**，同时使大气污染物排放量随之削减。欧洲（尤其是西欧和北欧发达国家）的经验表明，随着天然气、核能和可再生能源的大量引入，煤炭消费量在近 50 年来明显下降，对大气污染物排放量的削减和空气质量改善起到了关键作用。

除了控制全社会的煤炭消费总量外，**积极调整煤炭消费结构，控制分散、难以控制和难以监管的设备（如工业锅炉）的煤炭消费总量**，同时以技术手段控制大型集中式燃煤锅炉（如电厂）的排放，也能有效地降低大气污染物的排放量。美国的经验表明，通过积极调整工业结构，并通过大气污染控制政策对分散、难以控制和难以监管的行业在准入和淘汰方面进行限制，能有效地调整煤炭消费结构，促进大气污染物排放量的削减，实现空气质量改善。

第3章 我国煤炭消费控制总体思路

基于国内外燃煤污染控制经验,为实现大气环境质量的有效改善,应对气候变化的国际压力,需要尽快开展煤炭消费控制,包括控制煤炭消费总量、调整煤炭消费布局、优化煤炭消费结构、提高煤炭利用技术等方面内容。本章在对能源消费需求和煤炭消费总量影响因素分析的基础上,探索性地提出了我国煤炭消费总量控制政策框架与实施路线图。

3.1 我国燃煤污染控制实践

我国燃煤带来的二氧化硫、氮氧化物及颗粒物等大气污染物排放,是造成酸雨、PM_{2.5}、O₃等区域性大气污染的主要原因。由于不同时期面临的主要环境问题和认识水平不同,国家环境管理的战略重点和燃煤大气污染控制政策的侧重点也有所区别。

20世纪70年代,自1973年国务院第一次全国环境保护会议后,我国开始了以工业点源治理为主的大气污染防治工作,大气污染防治的重点是改造锅炉、消烟除尘、控制大气点源污染。进入80年代,随着经济的快速发展,能源消费量急剧增加,城市煤烟型污染越来越严重,燃煤污染控制的主要手段是控制燃煤硫份和鼓励高烟囱排放。1990~2005年期间,我国西南、华南地区出现大范围酸雨污染,城市二氧化硫污染更加突出,环保部门开始致力于二氧化硫污染防治,这一时期国家在全国尺度划定了“两控区”、在城市尺度划定了“禁燃区”,优化了煤炭消费的空间布局,并开始实施污染物排放总量控制。在“十一五”期间,我国将节能减排指标纳入各级政府政绩考核体系,燃煤污染控制的重点对象是二氧化硫、重点行业为电力行业,燃煤污染控制进入二氧化硫单项指标重点攻坚阶段,节能减排的主要手段是提高煤炭利用效率和强化末端治理。进入“十二五”以来,以PM_{2.5}和O₃污染为典型特征的区域复合型大气污染日益严重,从源头降低多种污染物排放量已成为改善空气质量的必然要求,因此我国逐步开始探索在重点城市、重点区域及重点行业实施煤炭消费总量控制制度。

3.1.1 20 世纪 80 年代重点控制燃煤硫份

为防治燃煤引起的城市大气污染问题，1984 年 10 月国务院环境保护委员会发布了《关于防治煤烟型污染技术政策的规定》，对煤炭尤其是高硫煤的加工、分配及利用的技术政策做出了明确规定。要求优先发展高硫煤洗选技术，提高煤炭质量，回收硫资源；凡用含硫量高于 1% 的原煤制作型煤，要加固硫剂，减少二氧化硫的排放；含硫量小于 1%、挥发份低于 10% 的煤种，优先供应民用；高硫煤洗选厂的中煤不得供应城市民用；高硫煤供给有脱硫装置或有高空排放设施的单位使用。同时规定在保证大气环境质量条件下，火电厂的含硫烟气可以利用大气的扩散稀释能力，采用高烟囱排放。在地理和气象条件不利于含硫烟气扩散稀释、人口稠密、工业集中、污染严重的地区要限制电厂装机容量。1987 年 9 月 5 日，《中华人民共和国大气污染防治法》正式颁布，确定了以防治煤烟型污染为主的大气污染防治基本方针，突出了燃煤烟尘污染防治的重点，并对改进城市能源结构结构，发展城市煤气，推广型煤的生产和使用等具体措施提出了明确要求。

由于这一时期国家允许通过高烟囱排放降低污染源附近的地面浓度，增加了污染物的长距离输送能力。到 20 世纪 90 年代，由于火电行业的高速发展，燃煤污染引起的酸雨和二氧化硫污染不断加剧，酸雨区面积不断扩大，我国成为世界第三大酸雨区。

3.1.2 1990 年加强两控区酸雨和二氧化硫污染控制

针对部分地区二氧化硫与酸雨污染的严重形势，从 20 世纪 90 年代开始，国家更加重视燃煤引起的二氧化硫及酸雨污染问题，划分了酸雨控制区和二氧化硫污染控制区（以下简称“两控区”），并颁布了一系列有针对性的政策。1990 年 12 月，国务院环委会第 19 次会议通过了《关于控制酸雨发展的意见》。1995 年 8 月，全国人大常委会通过了新修订的《中华人民共和国大气污染防治法》，规定“国务院环境保护部门会同国务院有关部门，根据气象、地形、土壤等自然条件，可以对已经产生、可能产生酸雨的地区或者其他二氧化硫污染严重的地区，经国务院批准后，划定为酸雨控制区或者二氧化硫污染控制区”，并要求“在两

控区内排放二氧化硫的火电厂和其他大中型企业，属于新建项目不能用低硫煤的，必须建设配套脱硫、除尘装置或者采取其他控制二氧化硫排放、除尘的措施；属于已建企业不用低硫煤的，应当采取控制二氧化硫排放、除尘的措施。在此基础上，原国家环保局对原《大气污染防治法实施细则》进行了修订，提出了改善城市燃料消费结构、综合整治城市大气污染的要求，规定煤炭含硫指标，防治燃煤污染，如“限制含硫份大于 2%、含灰份大于 30%的煤炭开采。新建的属于含硫份大于 1.4%、含灰份大于 20%的煤矿，必须建设配套的煤炭洗选设施，使煤炭的含硫份、含灰份达到国家规定的标准”。

1998 年 1 月，国务院批准了国家环境保护局拟订的“两控区”划分方案，明确提出了“两控区”酸雨和二氧化硫控制目标，发布了有关酸雨和二氧化硫污染控制的政策与措施。为了贯彻和落实国务院对“两控区”划分方案的批复意见，指导全国“两控区”的污染防治工作，国家环境保护总局于 1998 年 5 月制定了《“两控区”酸雨和二氧化硫污染综合防治行动方案》，明确要求“**限制高硫煤的开采、生产、运输和使用，推进高硫煤矿配套建设洗选设施，同时优先考虑低硫煤和洗选动力煤向‘两控区’的供应**”，对我国煤炭消费的空间布局提出了明确的要求。

鉴于大气污染控制形势的变化，2000 年我国对《大气污染防治法》再次进行了修订，在环境管理思想上发生了重大变革，具体表现在：我国大气污染防治工作开始从浓度控制向总量控制转变、从城市环境综合整治向区域污染控制转变，进入了一个新的历史阶段。新修订的《大气污染防治法》对燃煤污染控制提出了更加明确的要求：“大气污染防治重点城市人民政府可以在本辖区内划定禁止销售、使用国务院环境保护行政主管部门规定的高污染燃料的区域。该区域内的单位和个人应当在当地人民政府规定的期限内停止燃用高污染燃料，改用天然气、液化石油气、电或者其他清洁能源”，首次明确提出了“禁燃区”的概念。为贯彻新修订的《大气污染防治法》，控制燃煤造成的大气污染，我国相继出台了《关于划分高污染燃料的规定》、《燃煤二氧化硫排放污染防治技术政策》等一系列有针对性的技术规范及政策，各城市纷纷展开了城市高污染燃料“禁燃区”的划分工作，“禁燃区”的划分对改善城市特别是市中心的空气质量起到了重要作用。

同时，国家更加重视“两控区”的二氧化硫排放控制，制定了《酸雨和二氧化硫控制区污染防治“十五”计划》，计划要求到“十五”末，“两控区”内的二氧化硫排放量相比 2000 年减少 20%。为实现二氧化硫减排目标，“十五”期间针对燃煤污染控制提出了更加严格的要求：“禁止新建煤层含硫份大于 3%的矿井，对现有煤层含硫份大于 3%的矿井实行限产或关停；原煤入洗率达提高到 50%以上；“两控区”地方人民政府，可以制定有利于减少二氧化硫排放量、改善城市环境质量的的城市燃煤和燃油含硫量最高限值，限制高硫煤、高硫油的销售和使用”。

另一方面，为从大尺度上优化我国煤炭消费的空间布局，在这一时期我国开始实施“西电东送”战略。“西电东送”战略的实施使我国燃煤电厂在东部地区过度集中的现象得以明显改善，自 2000 年以后新增火电厂更多的布局于西部地区，火电厂燃煤的空间布局在大尺度范围得到优化。

3.1.3 “十一五”强化污染物末端治理工程

针对我国煤炭消费量与主要大气污染物排放量持续增长的严峻局面，从“十一五”开始，我国将节能减排指标纳入国民经济与社会发展的约束性指标，试图扭转以 GDP 为导向的政绩考核模式与单纯追求经济增长的发展方式。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》要求，“到 2010 年万元国内生产总值能耗相比 2005 年降低 20%左右，主要污染物排放总量相比 2005 年减少 10%”；2007 年 6 月，为进一步推动节能减排工作，国务院印发了《节能减排综合性工作方案》，提出了“控制新增量，调整产业结构，强化工程治理”的节能减排基本思路。

为实现节能目标，“十一五”期间国家针对电力、钢铁、焦化、有色、建材、化工等行业制定了 22 项国家强制性能耗限额标准，明确规定了现有企业（装置、机组）单位产品能耗限额限定值、新建企业（装置、机组）单位产品能耗限额准入值和单位产品能耗限额先进值等三项指标。能耗限额标准的实施促进了企业生产工艺、节能技术的进步。在“十一五”期间我国初步建立了以提高能源利用效率为主要途径，以工业企业为基本单元的节能模式。

为实现减排目标，国家环保总局和国家发改委联合发布了《国家酸雨和二氧化硫污染防治“十一五”规划》，将电力行业作为二氧化硫排放控制的重点行业，要求到 2010 年电力行业二氧化硫排放总量控制在 1000 万吨以内。对于非电力行业及民用燃烧设施主要是通过控制燃煤硫份和使用清洁能源控制二氧化硫排放，具体要求为：“严格控制新建煤层硫份大于 3%的矿井，对现有煤层硫份大于 3%的矿井实行限产或关停；高硫煤只能供给具有高效脱硫设施的大型燃煤机组或作为煤化工原料使用；限制城市民用燃料含硫量，对集中供热和生活燃煤必须燃用低硫煤、添加固硫剂的配煤或型煤；限制进口硫份大于 1%的煤炭、燃料油和石油焦，限制出口优质低硫煤炭”。“十一五”期间，对于电力行业污染减排的主要手段为烟气脱硫，对于非电行业燃煤污染控制的手段依然局限于硫份、洗煤及使用方式等方面，煤炭消费总量控制的概念尚未提出。

从“十一五”燃煤污染控制的效果来看，截止 2010 年我国二氧化硫排放量相比 2005 年减少 14.29%，煤烟型大气污染得到明显控制。但是 2010 年全国煤炭消费总量相比 2005 年增加了 35%左右，煤炭消费量的急剧攀升致使氮氧化物、颗粒物等多种污染物的排放量持续高速增长，由此引起的以 PM_{2.5}、O₃为典型特征的区域复合型大气污染问题日益凸显，多污染物协同控制被逐渐提上日程。

3.1.4 “十二五”开始重视煤炭消费总量控制等综合性措施

尽管自 1987 年以来我国对《大气污染防治法》进行了两次修订，每次都对燃煤硫份、能源结构及使用方式等提出了明确的要求，但由于产业结构偏重、煤炭供需关系严重失调等多方面原因，上述措施均未产生显著的效果，大多数高硫煤依然被直接燃烧，煤炭占一次能源消费量的比重依然在 70%左右，我国以煤为主的能源结构在相当长时期内将难以改变。另一方面随着《火电厂大气污染物排放标准（GB13223-2011）》等一系列新排放标准的发布，对燃煤污染排放提出了更加严格的要求，污染减排的技术瓶颈也愈来愈突出。即使采用最先进的污染治理技术，在煤炭消费总量居高不下、煤质水平没有明显提高的情况下，也很难有效降低燃煤过程的各种污染物排放量。而燃煤排放的大量二氧化硫、氮氧化物及颗粒物又是引起区域复合型大气污染的主要原因，因此控制煤炭消费总量，从源头上减少多种污染物排放已成为改善我国大气环境质量的必然选择。

为合理开发煤炭资源，缓解资源环境压力，国家能源局发布的《“十二五”煤炭工业发展规划》中明确提出，到2015年将全国煤炭年产量控制在39亿吨，将煤炭生产能力控制在41亿吨/年以内。环境保护部为应对重点区域异常严重的复合型大气污染问题，组织编制了《重点区域大气污染防治“十二五”规划》，明确提出将煤炭消费总量控制作为改善大气环境质量的重要手段，要求“研究制定煤炭消费总量中长期控制目标，严格控制区域煤炭消费总量，探索把煤炭消费总量指标作为项目审批的前置条件，以总量定项目，以总量定产能，重点控制区新扩改建项目实现煤炭消费等量替代”。

在国家积极探索煤炭消费总量控制制度的同时，部分省市率先提出实施燃煤总量控制。以北京为例，首先提出对燃煤消费的绝对量进行控制，2011年北京市发布的《“十二五”时期能源发展建设规划》、《北京市清洁空气行动计划（2011-2015年大气污染控制措施）》要求在2015年将煤炭消费总量控制在2000万吨以下。但由于改善空气质量的迫切压力，2012年北京市又发布了《加快压减燃煤促进空气质量改善的工作方案》，明确提出将“十二五”燃煤总量由此前确定的2000万吨，进一步削减至1500万吨，并实现五环内无煤化目标，在2020年进一步将煤炭消费总量控制在1000万吨以内。除北京之外的其他省市，如上海、珠三角、乌鲁木齐城市群初步提出在“十二五”期间实现煤炭消费总量零增长，江苏省、浙江省和山东省提出在“十二五”期间煤炭消费总量增幅控制在10%以内，天津、河北提出在“十二五”期间煤炭消费总量增幅控制在15%以内。

无论从国家层面，还是地方政府来看，煤炭消费总量控制制度已逐步从设计阶段走向实践，这标志着我国在重点区域、重点城市及重点行业实施煤炭消费总量控制的时机已逐渐成熟。

3.2 煤炭消费控制内涵

从国内外燃煤污染控制实践来看，为了减少煤炭使用过程中的大气污染物排放，可以采取降低煤炭消费量、优化煤炭使用结构、应用先进污染控制技术等诸多手段，针对燃煤污染严重的地区，还应限制耗煤工业项目在该区域的布局。总体而言，煤炭消费控制的出发点是降低煤炭消费的环境影响，具体包括四

个方面的内容，即控制消费总量、优化区域布局、调整使用结构及提高技术水平。

控制煤炭消费总量，是指为了达到城市或区域空气质量改善目标、污染物总量控制目标及节能目标，在一定的污染治理水平和能源效率水平下，将该区域的最大煤炭消费量控制在一定范围内，即**设定区域煤炭消费总量控制“天花板”**，从源头上减少多种污染物产生量，减轻末端治理压力。要实现煤炭消费总量控制，必须把能源节约和环境保护作为经济发展的基本目标和制约条件，统筹发展速度、产业结构和消费模式，改变“以粗放的供给满足增长过快的需求”模式，实现“以科学的供给保障合理的需求”，**提高能源利用效率，并增加天然气、水电、核能等能源品种的供应量**，为控制煤炭消费总量创造条件。

优化煤炭消费布局，是基于污染物扩散、稀释、自净能力的空间差异性，来约束、控制煤炭消费的区域分布，从而有效指导耗煤产业的空间布局。优化煤炭消费布局的基本出发点是**确保区域大气环境使用功能达到空气质量限值要求**，因此对大气污染较为严重、迫切需要采取措施改善空气质量、确保大气环境使用功能的区域，应严格控制煤电、钢铁、焦化、建材等耗煤行业发展。

调整煤炭消费结构，是指考虑到不同行业的煤炭利用效率、污染物排放控制水平与监管条件等方面的差异，调整煤炭消费总量在不同行业之间的分配。通过加严排放标准、提高排污成本等政策手段，**限制原煤在分散、难以控制和难以监管的设备（如小型燃煤锅炉、窑炉等）中燃烧**，使煤炭消费量向安装了高效烟气治理设施的电厂、集中供热锅炉等大型燃煤设施集中，从而降低大气污染物排放量，有效改善空气质量。

提高煤炭利用水平，是指提高燃煤技术水平、污染物排放控制技术与管理水平，**降低生产单位产品的煤炭消费强度与污染物排放强度**。发展和应用先进的能源利用技术与污染控制技术，是实现节能提效、优化能源供应结构、减少污染物排放的重要支撑，包括节能技术、洗选煤技术、先进发电技术和高效烟气治理技术等。

3.3 煤炭消费总量影响因素分析

综合来看，全社会能源消费需求与煤炭消费总量受到经济、政治、社会、资源、环境、技术等诸多因素的影响与制约，包括经济发展阶段与发展方式，政绩考核模式，城市化率与居民消费需求，能源供应结构，煤炭消费结构，煤炭质量，能源利用技术与污染控制技术，能源与环境管理制度等。通过辨识出哪些因素是可操作或可引导的，将有助于确定我国的煤炭消费总量控制模式与途径。

(1) 能源需求总量影响因素

在现阶段，煤炭是我国重要的基础性能源，煤炭消费需求与能源消费总量密切相关。从根本上说，全社会能源消费需求是由经济发展阶段所决定的，GDP 增速和单位 GDP 能耗强度决定了总能耗的大小。在已经实现工业化的发达国家，能源开发和利用设施的数量基本饱和，GDP 和能源需求缓慢增长，能效成为影响能源需求的最主要因素。我国正处于工业化、城镇化和机动化并举的经济高速发展阶段，产业结构呈现“重工业化”，基础设施与居民消费需求旺盛，大量的“土木钢铁”消耗导致了巨大的能源消费“增量”，即使能效不断提高，但所减少的能耗立即被 GDP 的巨大增长所抵偿，能源总量与强度上升有其必然的原因和内在规律。但是也必须意识到，由于我国经济发展的内部条件和外部条件与发达国家工业化时期所处的宽松的资源和环境条件不可同日而语，我国不得不在多重约束因素，即能源资源供应紧张、环境保护和应对气候变化国际压力等限制的夹缝中发展，因此我们必须走新兴工业化道路，用更少的能源、更干净的用能方式实现经济发展和人民生活水平提高。

先行工业化国家的经验表明，在进入工业化过程时，的确有一个能源强度提高的过程，但是随着工业化进程，能源强度将进入峰值期，并进一步进入下降期。重工业化的发展阶段虽然难以逾越，但**通过调整产业结构、应用先进技术等措施，可以有效削减能源强度的峰值并缩短上升的持续时间**。从图 3-1 可以看出，越晚进入工业化阶段的国家，能源强度上升的峰值高度越较先行工业化国家明显下降，不少国家的峰值强度明显低于先行国家当时的强度水平。例如日本就实现了最节能的经济增长，“坡峰”最低、“下坡”速度最快，在工业化加速发展后期就实现了能源强度的下降。我国目前正处于工业化加速发展的高耗能阶

段，能源强度变化正处于“坡峰”期，要突破能源、资源、环境的多重制约，实现经济社会的可持续发展，必须尽快改变 GDP 至上的政绩考核模式，真正把能源、资源节约和环境保护作为经济发展的基本目标和制约条件，促使各级政府将关注点由单纯追逐高 GDP 增速转变到重视增长的质量上来，进而改变过去那种依靠资源性产品扩张、片面扩大制造业产能的经济发展方式，使工业化进程尽快向提高单位附加值的方向转变。

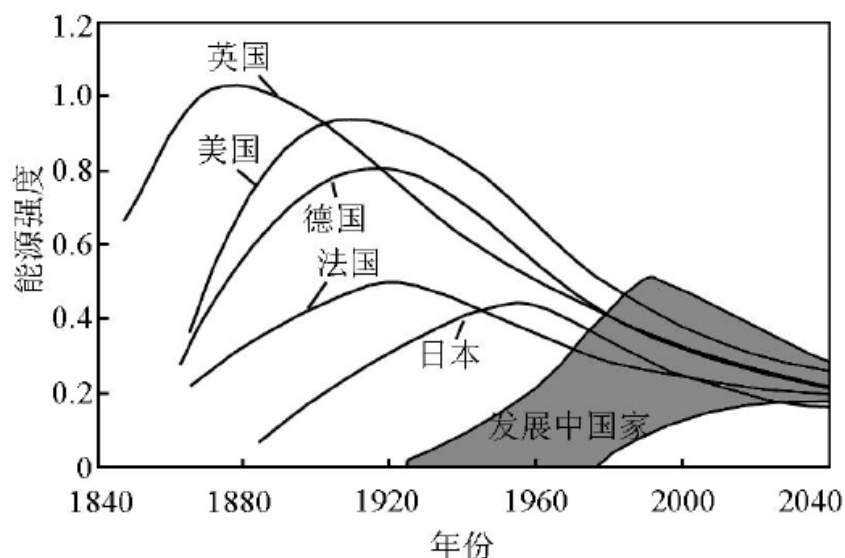


图 3-1. 工业化过程的能源强度变化曲线

（资料来源：周大地. 中国工程科学，2011.）

（2）煤炭消费总量影响因素

在一定的能源消费需求条件下，煤炭消费量将由能源供应结构所决定。在我国一次能源生产量中，煤炭、石油、天然气占到 90% 以上，水能、核能、风能、太阳能等非化石能源仅占一次能源生产量的不到 10%。由于我国非化石能源的发展速度跟不上能源消费总量的增长速度，能源消费增量基本靠煤炭生产来满足，近年来我国煤炭消费量一直占能源消费总量的 70% 左右。大量的煤炭开采与消费造成了严重的生态破坏与环境污染，必须尽快发展新能源技术，用洁净的新能源代替煤炭，来补充总能源消费需求增量，将煤炭消费量控制在合理范围内。同时要采用先进的煤炭生产技术和高效、洁净的煤炭利用技术，大幅度提高煤炭生产的安全度、煤炭利用的效率与洁净化程度，在不破坏生态环境、不影响空气质量

的前提下实现煤炭的可持续开发和利用。

3.4 煤炭消费总量控制框架设计

3.4.1 政策定位

煤炭消费总量控制是指以控制一定时段内一定区域内耗煤单位煤炭消费总量为核心的能源与环境管理方法体系，其基本出发点是改善区域空气质量，使大气环境功能满足空气质量标准的要求，并实现污染物总量控制目标及节能目标的要求，从源头上实现多污染物综合控制与节能减碳。

煤炭消费总量控制包含了三大关键要素：一是煤炭消费总量控制目标，二是煤炭消费总量控制目标的时空跨度，三是煤炭消费总量控制目标的空间与行业分布。不同要素的具体内涵如下：

第一，煤炭消费总量控制目标是指满足特定约束目标的最大允许煤炭消费量。从广义上说，煤炭消费受到社会经济各个领域诸多因素的影响与制约，但从其与大气环境保护的“制约-反馈”关系来看，煤炭消费量主要受三大因素的影响：一是大气环境质量目标的约束，也就是基于空气质量改善目标的污染物最大允许排放量的约束；二是一段时期内大气污染物总量控制指标的约束；三是应对气候变化碳排放强度目标的约束。因此，煤炭消费总量控制目标本质上是满足特定大气环境保护目标与应对气候变化目标的最大允许煤炭消费量。当然由于不同的社会经济发展阶段，煤炭利用技术有不同的选择，煤炭消费控制管理的政策也有所不同，这使环境社会经济系统与煤炭消费的协调程度具有可调控性，进而使得最大允许煤炭消费量也具有一定的可调控性。

第二，煤炭消费的时空跨度是指煤炭消费总量控制的地域范围和时间跨度。煤炭消费总量控制的对象往往是一些大气污染较为严重、迫切需要采取措施改善空气质量、确保大气环境使用功能的区域，具有明确的地理边界范围。此外，煤炭消费总量控制目标还具有时效性，随着公众对空气质量改善的需求的不断提高，大气环境质量目标与总量控制目标不断加严，加之煤炭使用技术与政策的变化，导致不同时期煤炭消费总量控制目标要进行相应调整。

第三，煤炭消费的空间与行业分布是指一定时间内煤炭消费总量控制指标在区域内的空间分配及行业分配情况。由于污染物扩散、稀释、自净表现出的大气环境条件存在很大的空间差异性，使得在不同地区消费等量煤炭对空气质量有着不同的影响。通过调整钢铁、焦化、建材、煤电等产业布局，能有效降低煤炭消费对环境质量的影响。另一方面，不同行业消费等量煤炭排放的污染物量差别也较大，优化煤炭消费总量控制指标在不同行业之间的分配，能有效降低大气污染物排放量。

3.4.2 控制模式

煤炭消费总量控制可以有多种模式，包括国家、区域、城市、行业等不同层次的控制，以及约束性指标与导向性指标两种操作模式。不同控制模式之间既有区别又有联系，具体分析如下。

国家层次的控制主要体现在转变经济发展方式、调整能源发展战略以及优化重点行业发展布局等重大战略性调整，包括将节能减排要求纳入经济与社会发展的约束性指标，调低 GDP 增速预期，改变政绩考核模式；加快天然气与水电开发，积极发展核电技术，支持风能、太阳能、生物质能等新能源技术的发展；调整能源产业及钢铁、石化等重化工业布局，包括实施西电东送、西气东输等重大战略措施。

区域及城市层次的控制强调以改善空气质量为出发点，其核心是实现城市空气质量达标。具体实施途径不仅包括调整产业结构和能源供应结构从而控制煤炭消费总量，还包括改善煤炭消费结构，将分散的小型燃煤锅炉以大型集中供热设施或热电联产替代，同时应用高效的能源利用技术及污染物排放控制技术，降低煤炭消费强度与污染物排放强度。

行业煤炭消费总量控制的对象主要包括煤电、钢铁、建材、焦化、石化等行业，其核心是实现行业的适度发展，提高技术水平，降低单位产品耗煤量与污染物排放量。具体实施途径是基于行业污染物总量控制目标与节能目标要求，对行业发展规模进行适当限制，同时推广应用先进生产技术与设备，替代高能耗、高污染的落后产能，并应用高效污染物排放控制技术。

表 3-1 不同煤炭消费总量控制模式比较

控制模式	调控因子	约束条件
国家控制	GDP 增速，产业结构（单位 GDP 能耗或单位工业增加值能耗），产业布局，能源供应结构	国家污染物总量控制目标，国家节能目标
区域控制	GDP 增速，产业结构，产业布局，能源供应结构，能源利用技术（单位产品耗煤量），污染物排放控制技术（吨煤污染物排放水平或单位产品污染物排放水平）	（区域或城市）空气质量目标，污染物总量控制目标，节能目标
城市控制		
行业控制	行业发展规模，行业空间布局，生产工艺、技术与设备（能源消费结构、用能技术水平），污染物排放控制技术	行业污染物控制目标，行业节能目标

3.4.3 政策框架

煤炭消费总量控制，是涵盖国家宏观经济政治决策、能源与环境管理、社会文化引导等诸多领域的综合性管理体系，包括发展战略、规划、法律、法规、政策、标准等多重调控手段，并由相应的管理体制、机制以及技术装备、文化氛围等作为支撑；目的是实现节能、提效，合理控制能源需求总量，调整以煤为主的能源供应结构，逐渐减少煤炭消费增量，同时通过优化工业布局、调整煤炭利用结构以及应用洁净煤技术和先进的污染治理技术，降低煤炭消费过程的污染物排放强度。政策框架图如图 3-2 所示。

（1）科学制定经济与能源发展战略、规划

首先要通过顶层制度安排，对未来生活水平、经济总量、产业结构进行正确的定位和引导，不宜追求过高的 GDP 增长速度，要注重发展的质量和效益，减少能源需求的数量；其次要对发展方式进行科学的规划和政策引导，避免产能过

剩等问题导致的能源浪费；第三要从全局角度对地区和行业之间的产业结构、数量、比例进行优化部署，通过科学规划，统筹安排产业发展、能源供应与污染物排放控制等，实现科学、节约和清洁发展。

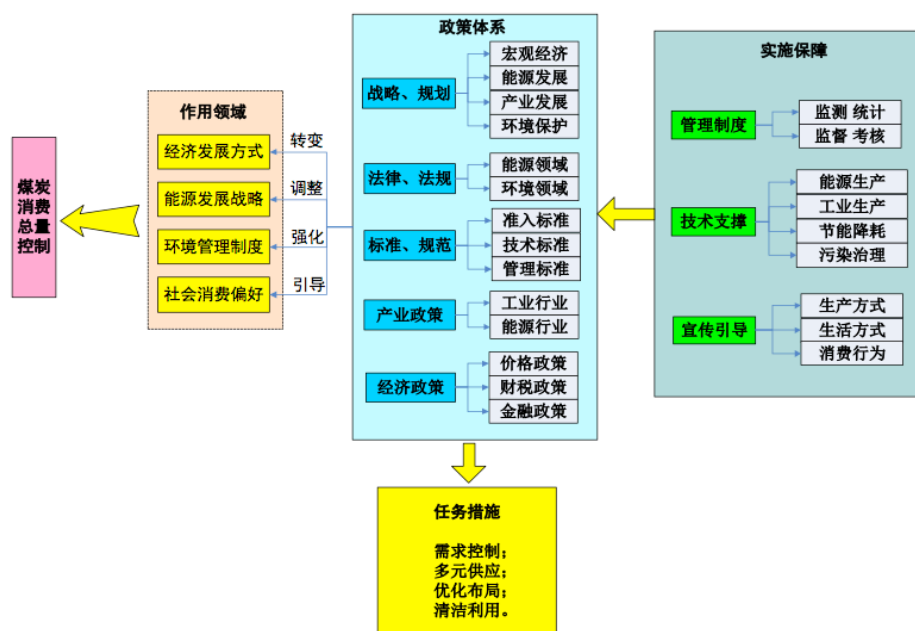


图 3-2. 煤炭消费总量控制政策框架图

（2）完善有利于控制煤炭消费的法律法规体系

我国目前基本形成了以《煤炭法》、《电力法》、《节约能源法》和《可再生能源法》等单行法为核心，一系列行政法规、部门规章为支撑的能源法律法规体系，但缺少全面体现能源战略和政策导向的能源基础性法律。需要尽快出台《能源法》，加强国家对能源领域的战略管理和统筹谋划，促进能源的合理有序开发和高效清洁利用。同时还应结合各能源行业的发展形势与任务，修订完善各单行法及配套规章制度，抓紧制定出台缺位法律法规。同时应探索在环境领域的法律法规体系中，引入基于大气环境保护的区域煤炭消费总量控制制度。

（3）加强有利于节能环保的标准体系建设

完善各类准入标准、技术标准与管理标准。加强能源技术标准、能效标准与环保标准体系建设，完善能源生产、储运、消费全过程的环保标准建设，建立健全能源生产生态环境管理标准、能源活动温室气体排放标准以及能源产品绿色设计标准等。

（4）完善有利于结构调整的产业政策体系

通过完善工业行业及能源产业政策体系，促进高耗能工业结构调整，鼓励高附加值工业和新能源产业发展，优化工业行业和能源项目布局。

（5）完善促进节能减排的经济政策体系

与行政手段相比，经济政策是市场经济环境下更为有效的管理手段，有利于激发地方和企业节能减排的内在动力。完善促进节能减排的经济政策体系，首先要理顺能源价格政策，建立起反映市场供求关系、资源稀缺程度以及能源生产和使用过程中的环境损害成本的能源价格形成机制，将环境外部成本内部化，使清洁能源真正具有价格优势；二是要完善现行的财税政策，有效发挥财政预算、国债投入、财政贴息、能源资源税费、关税、消费税、税收优惠、限制性税收政策等多种财税政策工具的杠杆作用，形成有利于节能环保和清洁能源发展的财税政策体系，引导社会生产和消费方式转变，推动能源供应结构改善；三是应用金融工具，对节能环保技术、可再生能源发展等予以扶持。

（6）强化煤炭消费总量控制的实施保障措施

健全管理制度。首先要改革能源管理体制，完善经济、能源与环境综合决策机制，加强和改善能源宏观调控；二是要将传统的按能源品种进行“条条”管理，向按能源管理流程进行“块块”管理转变，提高能源管理的综合性、协调性和有效性；三是建立煤炭消费总量控制目标责任制，把煤炭消费总量控制要求作为约束性指标，纳入政绩考核体系，并建立相应的评估、考核与责任追究制度；四是把节能、环保指标作为区域规划、项目审核的必要条件，严格建设项目准入；五是加强项目建设期和投入运营后的节能与环保监管，创造有利于能源节约和高效利用，有利于清洁能源和可再生能源发展的政策和体制环境。

强化科技支撑。增加科技投入，对洁净煤技术、高效能源利用技术、污染减排技术、先进发电技术、新型用能技术、新型核电技术等制定具体的发展路线图，并进行重点科技攻关。建立新能源发展专项基金，支持科技研发和工程示范，突破技术经济瓶颈，促进自主创新。

加强宣传教育。大力提倡绿色消费和生态文明理念，把资源承载能力和生

态环境容量作为经济活动的制约条件。从各级政府机构带头，到全民素质的提高，倡导适合中国国情的“健康的物质消费、丰富的精神追求”的消费方式、生活方式，引导形成有利于节能减排的社会风尚。

3.4.4 实施路线图

煤炭消费总量控制实施路线图包括时间、空间及控制模式上的安排，需要与国家节能减排战略的总体安排相衔接。根据《中国能源中长期（2030、2050）发展战略研究》对于我国能源发展阶段的战略定位，**2050年以前是我国能源体系的转型期**，能源结构、“颜色”、质量都将发生革命性的变革，将从现在比较粗放、低效、污染、欠安全的能源体系逐步转变为节约、高效、洁净、多元、安全的现代化能源体系。2050年以后，我国将拥有一个中国特色的能源新体系，进入比较自由的绿色、低碳能源发展阶段。**2030年以前，是上述转型期中的攻坚期（困难期）**，其间要花大力气形成节能提效机制，实现新型能源（包括核能、可再生能源等）的突破、化石能源的安全环保生产和清洁利用，控制污染物和温室气体排放。**通过实施科学、绿色、低碳能源战略，预期到2030年前后，我国能源发展将出现历史性的转折点，其标志是：节能、提效达到先进水平，能源结构明显改善，煤炭年利用量越过峰值，煤炭科学安全生产和洁净化利用达到先进水平，燃煤污染问题基本解决，二氧化碳排放量达到峰值。**2020年以前，特别是“十二五”时期，是我国全面转向科学发展轨道、决定能源转型的攻坚任务能否完成的关键期。在此阶段，经济发展方式应实现重大调整，能源消费增长速度和结构将有显著变化，节能、提效、减排取得新的明显成效，从以粗放的供给满足增长过快需求的模式，尽快转变为以科学的供给保障合理需求的能源供需新模式，以能源发展模式的转变支撑科学发展。

基于以上战略判断，并从空气质量改善的实际需要出发，从“十二五”开始，我国就应开始实施区域煤炭消费总量控制，尤其是在空气污染严重的京津冀、长三角和珠三角三大重点区域，以煤炭消费总量控制推动上述地区实现经济转型，为节能减排和空气质量达标创造条件。“十三五”及以后应结合国家大气污染防治战略，在其他大气污染防治的重点区域内实行煤炭消费总量控制，并结合应对温室气体排放控制国际压力的需求，择期在全国范围内全面推行煤炭消费总量控

制。从控制模式上来看，近期建议采取区域控制与行业控制相结合的控制模式，中长期应根据温室气体排放控制需求，将国家总量控制提上议事日程。

第4章 煤炭消费总量控制目标测算技术方法

煤炭消费总量受环境空气质量改善要求、污染物总量控制阶段性目标等因素的制约，而煤炭利用空间布局及行业结构、能源利用技术、污染治理水平等使这种约束力具有可调控性。本节将统筹考虑上述多种因素，研究环境质量约束下的城市/区域最大允许煤炭消费量测算方法和节能减排要求下行业煤炭消费总量控制目标测算方法。

4.1 城市和区域煤炭消费总量控制目标测算方法

4.1.1 技术路线

基于城市空气质量达标要求或污染减排目标确定污染物排放上限，以不同地区、不同行业、不同污染控制技术下单位煤耗污染物排放强度为依据构建煤炭最大允许消费量优化模型。以煤炭消费量最大化为目标（充分利用环境容量资源），利用线性优化技术计算不同地区、不同行业、不同污染控制技术情景下的煤炭最大允许消费量，具体技术路线如图 4-1 所示。

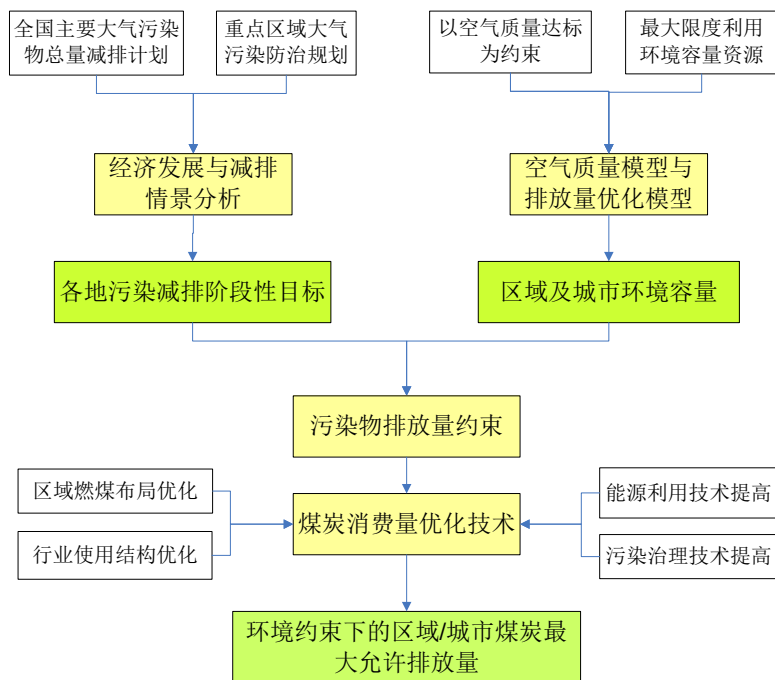


图 4-1. 环境约束下煤炭最大允许消费量估算技术路线

区域大气污染防治以城市为基本单元,各种大气污染控制手段包括煤炭消费总量控制最终将落实到各城市,因此在城市层面研究煤炭消费总量控制技术方法更具实践意义和普遍意义。导致城市大气污染的直接原因是各种大气污染物排放量超过环境承载能力,而大气污染物排放又与煤炭消费总量、煤炭利用水平、燃煤污染治理技术等因素密切相关。因此,从源头减少煤炭消费量、提高污染治理水平是降低污染物排放量,实现城市空气质量达标的根本途径。基于城市空气质量达标约束下的煤炭最大允许消费量的测算方法可以归纳如下:

(1) 确定环境容量

核定城市煤炭最大允许消费量的核心与前提即确定环境容量,环境容量既是确保城市空气质量达标的支撑条件,也是约束煤炭消费总量的关键要素。因此,环境容量是建立“城市空气质量达标”对“煤炭消费总量”约束关系的桥梁。目前环境容量的核算方法大多采用空气质量模型与多目标线性优化技术。

(2) 估算煤炭最大允许消费量

各污染物排放量与煤炭消费总量、污染治理水平等因素存在密切关系。因此,估算煤炭最大允许消费量首先应建立“排放量—煤耗量—治理水平”三者之间的约束方程。基于“排放量—煤耗量—治理水平”三者之间的约束方程,考虑污染治理水平进步,设定不同技术进步情景,通过环境容量核定不同技术情景下的煤炭最大允许消费量。

4.1.2 淄博市空气质量达标约束下的最大煤炭消费量计算

淄博市是我国目前空气污染最为严重的城市之一,本节以淄博市为案例分析城市空气质量达标对煤炭消费总量的约束。

(1) 环境容量计算情景

基于环境质量的总量控制目标或最大允许排放量(即环境容量)是包含自然规律参数和社会效益参数在内的多变量函数。大气环境容量不仅受客观因素的影响(如气象、地形、污染源布局及外来源的影响等),同样受到主观因素的影响(如空气质量标准的提高、人们对环境质量更高层次的要求等),因此环境容量的计算须基于一定的假设条件之下。尤其对于城市尺度的大气环境容量而言,由

于城市的空间范围相对较小，环境容量受外来源变化的影响较大，外来源的同步削减必然能为本地腾出更大的环境容量空间。基于以上原因，对于核定淄博市主要大气污染物的最大允许排放量，共设计 4 个污染控制情景，各情景的基本假定具体见表 4-1 所示。

表4-1. 淄博市大气污染控制情景

污染控制情景	基本特征	基本假定
情景 1 (区域统筹)	统筹考虑本地源、外来源对环境质量的影响，通过对区域污染源排放最优化控制实现空气质量达标	假定扬尘对 PM ₁₀ 浓度的贡献率保持在 50% 不变，意味着扬尘与工业颗粒物同步控制
情景 2 (极端情景)	外来源主要大气污染物排放量不发生变化，通过对本地污染源排放最优化控制实现空气质量达标	
情景 3 (近期情景)	外来源二氧化硫排放量削减 20%，氮氧化物排放量削减 20%，颗粒物排放削减 20%；通过对本地污染源排放最优化控制实现空气质量达标	
情景 4 (远期情景)	外来源二氧化硫排放量削减 40%，氮氧化物排放量削减 40%，颗粒物排放削减 40%；通过对本地污染源排放最优化控制实现空气质量达标	

(2) 新标准下的环境容量

SO₂、NO_x、PM₁₀ 三项污染物环境容量的计算，以污染物放量最大化为目标函数（充分利用环境容量资源，尽可能的减少减排成本），以《环境空气质量标准》（GB3095-2012）要求的年均浓度二级标准为约束条件，通过多目标线性优化方法计算，计算公式如下：

目标函数：

$$\text{Max } F(Q) = \sum_{i=1}^8 Q_i \quad (4-1)$$

约束方程：

$$\sum_{i=1}^8 Q_i a_i + D \leq C_0 \quad (4-2)$$

式中，Max F(Q)为淄博市各污染物排放量目标函数（吨）；Q_i分别为淄博市 8 个区县的污染物最大允许排放量（吨）；a_i为第 i 个区县单位污染物排放量对城市污染物年均浓度贡献量（μg/m³/t），依据空气质量模型模拟结果确定；D 为各污染物浓度背景值；C₀为空气质量年均浓度二级标准（μg/m³），SO₂、NO₂、PM₁₀ 分别取 0.06μg/m³、0.04μg/m³、0.07μg/m³。

依据公式 4-1 和 4-2 计算出不同情景下淄博市 SO₂、NO_x 及 PM₁₀ 的环境容量，如表 4-2 所示。山东省已被纳入《重点区域大气污染防治“十二五”规划》，根据规划要求，各城市间将逐步建立大气污染联防联控机制，实施城市间的统筹协调控制，因此基于情景 1 计算的环境容量能够反映淄博市未来实际环境容量，即全市 SO₂、NO_x、PM₁₀ 环境容量分别约为 8.03×10⁴t、19.16×10⁴t、3.21×10⁴t（不含扬尘），SO₂、PM₁₀ 环境容量比 2009 年实际排放量低 60%、50%左右。

表4-2. 淄博市年均值达标约束下的二氧化硫最大允许排放量（万吨）

区县	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4
二氧化硫	8.03	3.06	6.04	8.19
氮氧化物	19.16	29.57	31.81	34.05
可吸入颗粒物	3.21	3.11	3.71	3.98

（3）环境容量对煤炭消费总量的约束

1) 环境容量与煤炭量之间的约束关系

大气污染物排放量主要与能源消费情况和污染治理水平（利用单位煤耗污染物排放强度表征）有关，“排放量—煤耗量—治理水平”三者之间的关系可用公式 4-3 表示：

$$Q_i = M \times f_i \quad (4-3)$$

公式中，Q_i 为第 i 种大气污染物排放量（吨）；M 为煤炭消费总量（吨）；f_i 为单位煤耗污染物排放强度（吨污染物/吨煤炭）。

为了确保城市空气质量达标，各污染物 Q_i 的最大值不允许超过环境容量。以淄博为例，二氧化硫、氮氧化物、可吸入颗粒物的 Q_i 最大不能超过 8 万吨、19 万吨、3.2 万吨。因此，淄博市二氧化硫、氮氧化物、可吸入颗粒物环境容量对煤炭消费总量的约束方程可表示为公式 4-4，约束方程 4-5 对应的约束曲线如图 4-2 所示。

$$M_i = Q_{imax} / f_i \quad (4-4)$$

$$M_{max} = \min(M_i) \quad (4-5)$$

公式中， M_i 为第 i 种污染物环境容量约束下的煤炭最大允许消耗量（吨）； Q_{imax} 为第 i 种污染物的环境容量（吨）； f_i 为单位煤耗各种污染物排放强度（吨污染物/吨煤炭）； M_{max} 为城市煤炭最大允许消耗量，取 M_i 的最小值，即各种污染物环境约束下煤炭最大允许消费量的最小值。这里的污染物包括三种：二氧化硫、氮氧化物和烟尘。需要说明的是，为了简化计算，这里的 f_i 取值为所有行业平均值，如果考虑不同行业的单位煤耗污染排放强度，可以利用 4-2 节中公式 4-6、4-7 详细计算。

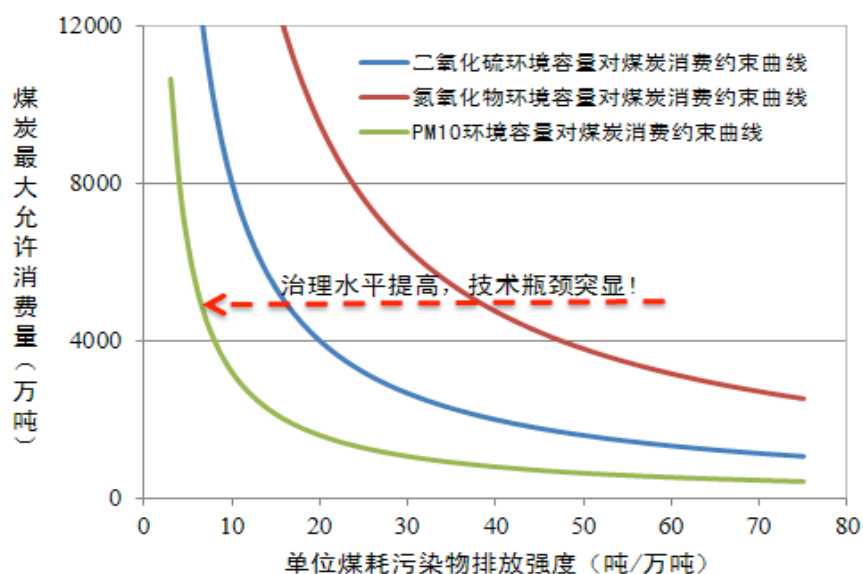


图 4-2. 淄博市大气环境容量对煤炭最大允许消费量的约束关系

2) 不同污染治理水平下的最大煤炭允许消费量

第一，基准情景方案，单位煤耗的污染物排放强度保持不变，即保持在 2010 年的污染治理技术水平。2010 年淄博市煤炭消费总量约为 4000 万吨，二氧化硫、氮氧化物、烟尘排放量分别约为 24.31 万吨、15.70 万吨及 6 万吨左右，单位煤耗二氧化硫、氮氧化物、烟尘排放强度分别为 60.78 吨/万吨、39.25 吨/万吨、15.00 吨/万吨。

第二，政策情景方案，单位煤耗二氧化硫排放强度降低 25%、单位煤耗烟尘排放强度降低 25%，单位煤耗氮氧化物排放降低 15%；

第三，强化控制情景方案，单位煤耗二氧化硫排放强度降低 50%、单位煤耗烟尘排放强度降低 50%，单位煤耗氮氧化物排放降低 30%。

依据公式 4-5, 基于不同治理水平计算的淄博市最大煤炭允许消耗量见表 4-4 所示, 可以看出即便在强化控制情景下淄博市最大煤炭消费量也仅为 2633 万吨, 相比 2010 年需减少 34%。

表4-3. 不同空气情景下的单位煤耗污染物排放强度

情景	单位煤耗二氧化硫 排放强度 (kg/t)	单位煤耗氮氧化物 排放强度 (kg/t)	单位煤耗烟尘排放 强度 (kg/t)
基准情景	6.08	3.93	1.50
政策情景	4.56	3.34	1.13
强化控制情景	3.04	2.75	0.75

表4-4. 不同空气情景下的煤炭最大允许消耗量

情景	基准控制情景	政策情景	强化控制情景
煤炭最大允许消耗量 (万吨)	1316.33	1755.11	2632.66
相比 2010 年减少 (%)	67.09	56.12	34.18

(4) 主要结论

1) 开展煤炭消费总量控制是保障城市空气质量达标的必要条件

淄博市二氧化硫、氮氧化物、可吸入颗粒物的环境容量分别为 8 万吨、19 万吨、3.2 万吨 (不含扬尘) 左右。要满足环境容量的约束, 即便在强化控制情景下淄博市最大煤炭消费量相比 2010 年需减少 34% 左右。因此, 如不对煤炭消费总量进行控制, 仅依靠提高治理技术水平, 淄博市空气质量难以达标。

2) 优化煤炭消费空间布局是改善城市空气质量的重要途径

淄博市不同区县的环境敏感性差异较大, 周村区、桓台县、张店区、淄川区单位污染物排放量对空气质量的综合影响明显大于其它区县。建议将张店区、淄川区、临淄区划分为高污染燃料禁烧区, 严格控制区内企业燃煤质量, 禁止高硫煤使用, 大力推广清洁燃料, 同时对以上区县内的高污染企业实施逐步搬迁计划。

3) 在污染严重的区域有必要开展区域煤炭消费总量控制

研究表明, 外来污染源对淄博市二氧化硫、二氧化氮、可吸入颗粒物浓度的

贡献率分别达 25%、20%、15%左右，以此推算仅外来源对淄博市二氧化硫年均浓度的贡献量已接近国家年均二级标准。因此，淄博市应积极参与山东半岛城市群区域联防联控工作，并依据《重点区域大气污染防治规划(2011-2015)》有关要求在区域层面参与及开展煤炭消费总量控制工作。

4.1.3 环境约束下区域最大允许煤炭消费总量估算

区域煤炭消费总量控制是建立在城市煤炭消费总量控制基础上的更大尺度的控制模式。区域最大允许煤炭消费总量估算的思路与城市尺度基本一致，主要目标同样是实现区域环境空气质量目标以及主要大气污染物总量减排指标要求。环境约束下的区域最大允许煤炭消费总量估算，即区域内各地区最大允许煤炭消费量之和。此外还需要特别注意：（1）区域层面的环境约束目标既可以是环境容量目标，也可以是污染减排目标，根据环境管理的要求因地制宜的选择；（2）在估算时应考虑区域内各地区之间污染物的传输和区域大气联防联控政策的作用。

4.2 行业煤炭消费总量控制目标测算方法

2010 年，我国工业煤炭消费量占全社会耗煤量的 94.8%，其中电力、焦化、钢铁和水泥行业是煤炭消费大户，合计占工业煤炭消费量的 70%以上，同时也是大气污染物的主要排放源，应作为煤炭消费总量控制的重点行业。行业煤炭消费总量控制目标测算技术方法的建立，应与国家节能减排政策以及相关标准的规定有效衔接，便于计算、统计与考核。

4.2.1 重点行业煤炭消费特征

4.2.1.1 电力行业

我国的电源结构以煤电为主，煤电装机容量和发电量长期位于世界第一位。截至 2010 年，我国发电装机容量达到 9.66 亿千瓦，全年发电量 4.23 万亿千瓦时，其中燃煤机组装机容量和发电量所占比例分别为 67.5%和 76.3%。根据中国电力企业联合会的统计数据，2010 年我国 6000 千瓦及以上电厂发电耗煤 15.9 亿吨，供热用煤 1.68 亿吨。近年来我国关停淘汰大量小火电机组，新建机组绝大部分

为大容量高参数机组,使我国电力部门的整体发电煤耗迅速降低。2005年至2010年,我国火电机组的平均发电标准煤耗从343g/kwh降低到了312g/kwh,平均供电标准煤耗从370g/kwh降低到了333g/kwh。目前火力发电煤耗和供电煤耗的国际先进水平分别是298gce/kwh和310gce/kwh³。

燃煤发电机组的能耗水平和污染物排放水平与燃用的煤质有很大关系。我国用于发电的煤炭中,平均灰份在20%~30%之间,平均硫份约为1%。和美国用于发电的煤炭(平均灰份9%、平均硫份1%)相比,我国电力燃煤的煤质较差,稳定性也较差。煤炭中每增加1%的灰分,每度电耗能就要增加1-3克标煤,脱硫也需要消耗大量能量。因此,对动力煤脱硫脱灰,是当前火电和工业锅炉节能的一个重要措施。此外,IGCC等新的发电技术以及煤电化多联产等技术的应用,也可以使煤炭的能量利用效率提高几个百分点。

4.2.1.2 焦化行业

根据我国的能源平衡表,2010年共有4.72亿吨煤用于炼焦,其中原煤0.58亿吨、洗精煤4.13亿吨;生产焦炭3.62亿吨,约占世界焦炭总产量的60%。焦炭主要用于炼铁,随着近年来我国钢铁产量的快速发展,焦炭消费量也高速增长,2010年钢铁行业的焦炭消费量共2.94亿吨,占当年全国焦炭总消费量的87%。随着我国高炉炼铁技术的发展,入炉焦比逐渐下降,在一定程度上减缓了我国的焦炭消费需求增速,然而钢铁产量的变化趋势仍然是左右我国焦炭消费量的决定性因素。

根据焦炭行业2005年的统计数据⁴,我国有33%的焦炭生产能力布局在钢铁联合企业内,67%的焦炭生产能力为独立焦化生产企业,除少数作为城市煤气供应的市政配套设施外,大部分集中在煤炭产区。独立焦化生产企业中存在着很大一部分中小型企业,尤其是在山西等煤炭生产大省,这些中小型企业的生产工艺和装备水平普遍较低。目前我国不符合《焦化行业准入条件(2008年修订)》和《产业结构调整指导目录(2005年本)》要求的小机焦和土焦约占焦炭生产能力的15%。这些落后产能的存在,导致我国炼焦行业的整体能耗水平大大高于发达

³王庆一,2010能源数据。

⁴发改产业[2006]328号 国家发展改革委关于加快焦化行业结构调整的指导意见的通知

国家，各种污染物排放也不能得到有效控制，吨焦粉尘排放、废水排放量都高于其他国家。

4.2.1.3 钢铁行业

钢铁工业作为国民经济重要的基础产业，是国家实现工业化、城镇化的支柱产业。近年来，国民经济的快速发展以及工业化、城镇化带动了钢铁工业的高速增长，从2000年到2010年，我国的生铁产量从1.31亿吨增长到5.97亿吨，粗钢产量由1.29亿吨增长到6.37亿吨，约占世界生铁和粗钢产量的50%和47%。与此同时，我国钢铁工业长期粗放发展积累的矛盾日益突出，产能过剩、产业布局不合理、资源环境压力大等问题制约着钢铁工业的健康发展。

2009年，我国重点大中型钢铁企业吨钢综合能耗619kg标煤，比国际先进水平高10%左右，另外大量落后产能存在能耗高、排放高，余能余热利用水平低，环保配套设施不完善的问题。随着钢产量的增长，钢铁工业总能耗也在增加，能源约束已经显现。钢铁工业的环保指标整体上仍比较落后，重点大中型企业平均吨钢SO₂排放量为2kg、吨钢烟粉尘排放量为1.4kg，与国际先进水平相比仍有差距。另外，我国钢铁工业生产结构中铁钢比偏高，温室气体排放量大，钢铁工业面临的节能减排压力较大。

钢铁生产中的能耗主要集中在炼焦、烧结和炼铁系统，占整个钢铁工业总能耗的比例分别为14.3%、6.4%和46.4%。煤炭占钢铁行业能源消费比例的70%左右，2010年钢铁行业煤炭消费量共2.82亿吨。钢铁行业煤炭消费主要分为两类，一类是炼焦用煤，另一类是烧结和喷吹用煤。进入“十一五”以来，钢铁企业的自产煤气利用率提高，煤、重油的消费比例有所下降。钢铁工业的节能潜力很大，主要措施包括淘汰落后产能、推行清洁生产、发展循环经济，以及推广应用高温高压干熄焦、烧结合余热发电、干式TRT发电、CCPP热电联产、焦炉烟道气煤调湿、高温焦炉煤气的能量回收、低温余热资源回收利用等先进技术。

4.2.1.4 水泥行业

2010年我国非金属矿物制品业共消费煤炭2.35亿吨，其中水泥制造是最主要的煤炭消费行业。根据2009年全国水泥熟料产量及全国水泥熟料平均标准煤

耗测算，2009年我国水泥窑系统的煤炭消费量为1.76亿吨，占当年非金属矿物制品业煤炭消费量的74%。水泥企业的煤炭消费主要用于熟料烧成系统，其他能源消费还包括电力、柴油和汽油，电力主要用于生产过程中各工序的主要设备，如生料磨、生料辊压机、回转窑、水泥磨、煤磨等，柴油和汽油主要用于各种类型车辆和设备。

近年来我国水泥产量快速增长，2010年全国水泥产量为18.82亿吨，占世界水泥总产量的50%以上。我国水泥工业常年存在着多种生产工艺并存的现象，发达国家早已淘汰的立窑产量在20世纪90年代中期一度高达81%；2000年以来，先进的新型干法水泥生产线迅猛发展，到2010年，我国的新型干法生产线数量从2000年的128条增加到1273条，熟料年生产能力从0.6亿吨增长到12.6亿吨。在大量建设新型干法水泥生产线的同时，我国对立窑、干法中空窑、湿法窑等落后产能加快了淘汰进程，新型干法水泥在水泥总产量中的比重从2005年的44%提高到了2010年的81%。“十一五”期间我国新建的新型干法水泥窑普遍规模都较大，大多是产能在4000t/日以上的生产线。与国际上的新型干法水泥生产线比，我国的新型干法水泥生产线不仅规模大，而且技术先进，普遍采用了生料辊压磨、带五级预热器和新型分解炉的回转窑、第三代冷却机、水泥挤压磨和高效选粉机等先进设备，使我国整体的新型干法水泥生产装备和工艺达到了当今国际先进水平。

随着新型干法水泥产量比例的快速提高，我国总体水泥熟料烧成煤耗大幅下降。一些优秀大型水泥企业的熟料标准煤耗已经达到或超过104kgce/t的国际先进水平。全国水泥熟料平均标准煤耗由2001年的150kgce/t下降了到2010年的115kgce/t（王燕谋，2011），不仅节能效果非常显著，而且降低了熟料烧成过程中的大气污染物排放量。

4.2.2 工业行业节能减排政策要求

出于对环境保护工作的重视，目前我国除了环保专项规划以外，在重点产业发展规划中往往也会包含对于污染物排放总量或排放强度的控制要求。此外，在环境保护标准体系中，清洁生产标准、污染物排放标准、环保工程技术规范等都

包含工业行业污染物排放控制要求，具体指标包括污染物排放浓度、单位产品污染物产生量及排放量、污染治理设施处理效率等。工业节能政策体系主要包括行业发展专项规划、淘汰落后产能的相关政策、《千家企业节能行动实施方案》、《重点能耗企业能效水平对标活动实施方案》、《国家重点节能技术推广目录》等，能源相关标准体系包括能源管理标准、产品生产能耗限额标准、计量监测标准、设备经济运行标准、清洁生产标准、节能设计技术规范等。其中，涉及到企业能耗指标具体规定的政策、标准主要有：

钢铁、有色、建材、化工等行业的 22 项国家强制性能耗限额标准（见表 4-5），规定了现有企业生产单位产品能耗限额的限定值、先进值和新建产能能耗限额的准入值指标，对达不到能耗限额限定值的落后产能要予以淘汰，新建产能必须达到产品能耗限额准入值标准。有些省级政府还出台了严于国家要求的地方性工业产品能耗限额标准。

清洁生产标准，规定了企业清洁生产的一般要求，共分为三级，一、二、三级分别代表国际清洁生产先进水平、国内清洁生产先进水平和国内清洁生产基本水平，其中清洁生产三级指标代表国内企业的平均水平，新建企业应达到清洁生产二级以上水平。

能效标杆指标体系，以单位产品能耗限额标准、清洁生产标准、节能设计规范等的指标规定为基础，比照国际或国内同行业先进企业能效水平设定标杆。指标体系一般包括两个层次，其一是反映全厂整体能源利用水平的综合性指标，主要用最终产品的单位能耗来表示，第二个层次是反映各主要工序和用能环节能效水平的指标，用工序能耗来表示。

表4-5. 22项能耗限额标准

序号	标准名称	标准编号
1	粗钢生产主要工序单位产品能源消耗限额	GB 21256-2007
2	铁合金单位产品能源消耗限额	GB 21341-2008
3	焦炭单位产品能源消耗限额	GB 21342-2008
4	炭素单位产品能源消耗限额	GB 21370-2008
5	水泥单位产品能源消耗限额	GB 16780-2007
6	建筑卫生陶瓷单位产品能源消耗限额	GB 21252-2007
7	平板玻璃单位产品能源消耗限额	GB 21340-2008

序号	标准名称	标准编号
8	烧碱单位产品能源消耗限额	GB 21257-2007
9	电石单位产品能源消耗限额	GB 21343-2008
10	合成氨单位产品能源消耗限额	GB 21344-2008
11	黄磷单位产品能源消耗限额	GB 21345-2008
12	铜冶炼企业单位产品能源消耗限额	GB 21248-2007
13	锌冶炼企业单位产品能源消耗限额	GB 21249-2007
14	铅冶炼企业单位产品能源消耗限额	GB 21250-2007
15	镍冶炼企业单位产品能源消耗限额	GB 21251-2007
16	电解铝企业单位产品能源消耗限额	GB 21346-2008
17	镁冶炼企业单位产品能源消耗限额	GB 21347-2008
18	锡冶炼企业单位产品能源消耗限额	GB 21348-2008
19	锑冶炼企业单位产品能源消耗限额	GB 21349-2008
20	铜及铜合金管材单位产品能源消耗限额	GB 21350-2008
21	铝合金建筑型材单位产品能源消耗限额	GB 21351-2008
22	常规燃煤发电机组单位产品能源消耗限额	GB 21258-2007

重点行业煤炭消费总量控制目标测算技术方法，可以在以上政策、标准中关于工业行业污染物排放总量控制目标、单位产品排放强度指标以及能耗指标的规定基础上建立。

4.2.3 基于节能减排要求的行业煤炭消费总量控制目标测算方法

(1) 基于区域污染物总量控制目标测算行业煤炭消费总量

基于区域大气污染物总量控制目标，以及重点行业煤炭利用和污染控制水平（吨煤排放强度），测算重点行业最大煤炭消费量，优化方程见公式 4-6 和 4-7。

目标函数：

$$Max M_i = \sum_{j=1}^n m_j \quad (4-6)$$

约束方程：

$$\sum_{j=1}^n (f_{ij} m_j + Q_{i \text{非煤}}) \leq Q_{i \text{max}} \quad (4-7)$$

公式中， M_i 为第 i 种污染物排放总量控制目标约束下的煤炭最大允许消费量

(吨); m_j 为第 j 个行业煤炭消费总量 (吨); f_{ij} 为第 j 个行业单位煤炭消耗带来的污染物 i 的排放强度 (吨污染物/吨煤炭); $Q_{i, \text{非煤}}$ 为工艺过程、机动车排放等不涉及煤炭消费的污染物 i 的排放量。该约束方程的含义为各行业的污染物 i 排放量之和不能超过污染物 i 的环境约束目标 $Q_{i, \text{max}}$, 在此约束条件下, 利用线性规划得出污染物 i 约束下的最大允许煤炭消费量 M_j 。需要说明的是, 为了避免煤炭全部集中到排放强度低行业的极端情况, 计算时还需根据实际情况给出各行业煤炭消费比例的范围, 或根据特定行业的污染物排放总量控制目标计算该行业的最大煤炭消费量。

(2) 基于单位产品能耗指标测算行业煤炭消费总量

工业行业煤炭消费总量控制, 不仅要满足大气污染物排放总量控制要求, 还应符合工业能耗指标控制要求。在煤炭消费总量重点控制地区, 重点行业单位产品能耗应达到国内先进水平或该行业能耗标杆值。基于能耗指标的行业煤炭消费总量估算公式为:

$$M_j = P_j \times g_j \times (1 + \omega_j) \quad (4-8)$$

M_j 为 j 行业在目标年的煤炭消费量; P_j 为基准年该行业产品产量; g_j 为生产单位产品的平均煤炭消耗量, 重点耗煤行业取值可参考表 4-6; ω_j 为估算期内该行业产品产量增长比例, 根据产业发展规划来确定。

表4-6. 2010年重点耗煤行业单位产品平均煤炭消耗量

行业	指标名称	指标值	取值原则
电力	平均发电煤耗	不高于 300 克 标煤/千瓦时	现役机组不高于 2010 年全国 30 万千瓦等级燃煤机组的平均发电标准煤耗 309 克/千瓦时; 新增发电量按《常规燃煤发电机组单位产品能源消耗限额》(GB21258-2007) 取值为 291 克/千瓦时。
焦化	焦炭生产平均煤炭消耗量	不高于 1.30 吨 /吨焦	全国平均值 1.30 吨/吨焦或该地区平均值 (取二者中的较小值)。

钢铁	生产单位烧结矿（球团矿）的固体燃料消耗量	39 千克/吨烧结矿（或 23 千克/吨球团矿）	根据烧结或球团工序能效标杆指标 ⁵ 取值。
	生产单位生铁的固体燃料消耗量	464 千克/吨生铁	根据炼铁工序能效标杆指标 ⁵ 取值。
水泥	平均熟料综合煤耗	110 千克标煤/吨熟料	根据《水泥单位产品能源消耗限额》（GB16780-2007），规模为 2000t/d~4000t/d 生产线的可比熟料综合煤耗限额先进值为 112 千克标煤/吨熟料；4000t/d 以上生产线的可比熟料综合煤耗限额先进值为 107 千克标煤/吨熟料。

⁵ 工业和信息化部，钢铁行业主要产品（工序）能效标杆指标，工信厅节函[2010]594 号。

第5章 区域煤炭消费控制实施途径

实施区域煤炭消费总量控制，必须依托于整个社会经济与能源发展模式的转变。应将节能、提效、合理控制能源需求总量作为首要战略措施；并积极发展天然气、水电、核电以及风能、太阳能、生物质能等清洁能源，实现能源的多元化供应，逐步实现以非煤能源满足能源需求增量；同时优化煤电、钢铁、焦化、石化、建材等产业布局；通过政策引导，促使煤炭消费结构向大型燃煤设施集中；大力推广应用先进的能源利用与污染治理技术，降低煤炭消费对环境的影响。概括而言，可以总结为以下指导方针：**需求控制，多元供应，优化布局，清洁利用。**

5.1 合理划分煤炭消费总量控制区，科学制定并分解控制目标

实施煤炭消费总量控制不应全国一刀切，全面限制煤炭消费增长，而应综合考虑各地区空气质量、大气污染物减排潜力、产业结构、煤炭消费现状等因素，科学设定煤炭消费总量控制区范围与控制目标，针对不同地区设定差异化的煤炭消费总量控制目标。

(1) 煤炭消费总量控制区划分

实施煤炭消费总量控制的重点区域划分，其核心依据是空气质量改善要求与煤炭消费强度，同时需要综合考虑大气传输规律、地区社会经济发展水平与阶段、能源消费特征、大气污染排放特征、相关国家政策要求等因素。**划分煤炭消费总量控制的重点区域，应坚持以下原则：**

一是与节能减排工作相结合。节能减排是实施煤炭消费总量控制的出发点，煤炭消费总量控制区域划分工作要与节能减排工作紧密衔接，满足节能减排工作要求，做到相互支撑。

二是与煤炭消费强度相结合。煤炭消费强度高、空气污染重的地区应率先实施煤炭消费总量控制。

三是与区域发展战略相结合。充分考虑地区资源禀赋、区域发展战略等，合

理划分需要实施煤炭消费总量控制的区域。

基于以上原则，建议将煤炭消费总量控制区域划分为总量削减区、零增长区、增速降低区三类。京津冀、长三角、珠三角等区域复合型污染严重地区应首先划定为煤炭消费量削减区，区域煤炭消费总量应逐年削减；其他大气污染控制重点区域，应加大煤炭消费控制力度，争取实现区域煤炭消费总量零增长；其它地区为增速降低地区。

(2) 煤炭消费总量控制目标分解与考核

第一要科学确定区域煤炭消费总量控制目标。综合考虑区域社会经济发展水平、能源消费特征、大气污染控制现状等因素，考虑不同地区、不同行业煤炭消费与污染物排放控制水平差异，兼顾公平与效益，制定重点控制地区煤炭消费总量控制目标。

第二要建立煤炭消费总量控制目标分解技术方法，将区域煤炭消费总量控制目标逐级分解，制定分城市、分行业的控制目标。

第三是实行目标责任管理，加强煤炭消费总量控制的监督考核，将目标完成情况做为各级人民政府领导班子和领导干部综合考核评价的重要依据，实行问责制，并向社会公开。

5.2 优化煤炭消费空间布局，重点地区增加天然气和电力输入

产业结构是影响能源消耗的重要因素，优化调整地区的产业结构可以直接影响区域煤炭消费总量。在产业发展规划和重大项目布局方面，要充分考虑地区环境容量、资源禀赋、行业发展现状等因素，将煤炭消费总量控制指标作为重点区域建设项目审批的前置条件，严格项目准入。京津冀、长三角地区禁止新建除热电联产以外的燃煤电厂以及钢铁、水泥、焦炭、有色冶炼等高污染项目。其他新建项目要实行煤炭消费总量的倍量替代。同时加大落后产能淘汰力度，关闭、搬迁现有污染企业。

在能源供应方面，对于煤炭消费总量重点控制地区，要增加天然气供应，并提高电力输入量。西部煤炭产区可以立足资源优势，承接产业转移，适度发展电

力工业等，但调整煤炭消费的空间布局不能使西部地区空气质量恶化，要防止污染转移。

5.3 调整燃料煤消费结构，降低小型燃煤设施煤炭消费量

由于火电行业大气污染物排放集中，烟气脱硫、脱硝、除尘技术成熟，单位燃煤的污染物排放强度远低于小型燃煤设施，因此应逐步提高电力行业的煤炭消费比例，积极推进热电联产为工业和民用采暖供热，降低其他工业锅炉和民用燃煤设施用煤比例。在城市内划定煤炭禁燃区，分散的燃煤锅炉逐步改用清洁能源或由集中供热锅炉替代。对于农村民用炊事、采暖用煤，应积极推进太阳能、沼气、电力、天然气等替代燃煤。

5.4 应用先进技术，提高煤炭加工与转化效率

煤炭利用技术水平与煤炭消费总量具有密切关系。据估算，2010年我国在用燃煤工业锅炉约有50万台，年耗原煤约6亿吨，占全国煤炭消费总量的20%左右。2010年工业锅炉燃煤排放二氧化硫约1000万吨、氮氧化物约200万吨、粉尘约100万吨，废渣约9000万吨，是我国仅次于燃煤发电的第二大煤烟型污染源。能效水平低下、污染物排放严重、自动化水平低等是燃煤工业锅炉存在的突出问题。采用高效节能环保锅炉技术，提高锅炉燃烧效率，也是控制煤炭消费总量的一个重要措施。最有代表性的技术主要有高效环保煤粉锅炉、高效燃煤节能技术等。以前者为例，有报道称，采用燃煤粉工业锅炉，锅炉效率将能达到86%以上，比传统锅炉高10%以上，可实现节煤30%以上，由于锅炉效率提高而带来的年节约燃煤量约8000万吨，由节煤减少SO₂排放160万吨（煤的含硫量按1%计算）。

在燃煤发电技术方面，为降低煤炭消耗与污染物排放，应积极推动配备烟气脱硫和脱硝的超（超）临界发电技术(SC/USC+FGD+SCR)、循环流化床锅炉(CFBC)、增压流化床联合循环(PFBC-CC)、整体煤气化联合循环(IGCC)等洁净煤发电技术的应用。

5.5 改善煤炭质量，提高动力煤洗选比例

煤炭质量是工业锅炉设计的依据，如果锅炉使用与设计煤种、煤质差别较大的煤炭时，往往产生燃烧不完全、温度分布及空燃比不完全、污染物难以控制等一系列问题。因此需要改善、稳定煤炭质量，以保证煤炭高效洁净利用，推动煤炭消费逐步降低。

原煤经过洗选，灰分降低，煤炭焦比得到改善，不仅节约了煤炭，同时也降低了大气污染物排放。目前很多国家十分重视煤炭的洗选加工，除炼焦煤全部入洗，大部分动力煤也要进行洗选加工。德国、日本、英国、澳大利亚原煤入洗率在 90%左右，而我国的原煤入洗比重不足。

为保证煤炭得到高效洁净利用，应严格限制高硫份、高灰分劣质煤炭的开采与使用。高硫煤优先用于煤化工和配备高效脱硫装置的燃烧设施。各城市应建立配煤中心，确保低硫、低灰优质煤炭供应。提高动力煤洗选比例，力争将煤炭入洗率逐步提高到 70%以上，接近发达国家水平。

第6章 煤炭消费控制政策建议

运用综合的政策手段，促进煤炭消费布局优化和能源利用结构调整，提高煤炭利用技术水平，为实施区域煤炭消费总量控制提供有力保障。主要政策措施包括：严格实施工业能耗限额和污染物排放标准，在重点控制区执行大气污染物特别排放限值，促进生产技术、煤炭利用技术和污染物排放控制水平的提升；充分发挥价格、财税、金融等经济政策的激励作用，将煤炭开发与利用过程中的环境损害恢复成本纳入煤炭价格形成机制，并通过强制性市场份额、投资补贴、税收优惠等各种措施，鼓励清洁能源发展，使清洁能源真正具有市场竞争优势；推行节能环保发电调度，降低电力行业煤炭消耗和污染物排放的总体水平。

6.1 完善法规标准，为煤炭消费总量控制提供支撑

6.1.1 加强能源、环保法律法规建设

完善能源法律法规体系。我国目前初步形成了以《煤炭法》、《电力法》、《节约能源法》和《可再生能源法》等单行法为核心，一系列行政法规、部门规章为支撑的能源法律法规体系，但尚缺少全面体现能源战略和政策导向的能源基础性法律。《能源法》是统领各专门法律及其配套法规的龙头法，必须加快制定出台，以便推动能源领域发展、改革和管理等重大问题的解决。通过出台《能源法》，规范能源战略规划、能源节约与环境保护、能源开发生产、能源加工转换、能源储备与运输、能源结构优化等行为，加强国家对能源领域的战略管理和统筹谋划，促进资源的合理有序开发和能源的高效清洁利用，解决经济发展与能源管理、环境保护之间的矛盾。同时还应结合各能源行业的发展形势与任务，修订完善各单行法及配套规章制度，抓紧制定出台缺位法律法规。

适时修订大气法，体现区域煤炭消费总量控制理念。2000年9月1日起施行的《中华人民共和国大气污染防治法》（以下简称《大气法》）对防治燃煤产生的大气污染做了若干规定，但未对控制煤炭消费总量提出要求。而且，该法也未涉及区域性大气污染问题。鉴于以三区十群为代表的重点区域大气污染严重，煤炭的集中消费在其中起到了重要作用，为扎实推进我国大气污染防治工作，切实

改善环境空气质量，适时修订《大气法》，增加区域煤炭消费总量控制内容，为相关工作的开展提供法律依据。

6.1.2 完善能源、环保标准体系

随着我国工业化和城市化的快速发展，能源发展中出现了能源资源约束与能源消耗过快增长的矛盾以及环境承载能力与能源开发利用中大气污染物排放量增加的矛盾等等。需要重视监管工作，通过完善能源、环保标准化机制，促进我国能源行业健康有序发展，从而也约束煤炭消费总量。

完善能源标准体系，加强能源技术标准、能效标准、安全生产与环保标准体系建设。完善能源生产、储运、消费全过程的环保标准建设，建立健全能源生产生态环境管理标准、能源活动温室气体排放标准以及能源产品绿色设计标准等。

完善环境保护系列标准，加强能源开发利用中的大气环境管理。目前，我国煤炭消费主要集中在电力、冶金、建材和化工等行业。行业型排放标准方面，新颁布了《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)、《钒工业污染物排放标准》(GB 26452—2011)、《铝工业污染物排放标准》(GB 25465—2010)、《铅、锌工业污染物排放标准》(GB 25466—2010)、《铜、镍、钴工业污染物排放标准》(GB 25467—2010)、《镁、钛工业污染物排放标准》(GB 25468—2010)，但《水泥工业大气污染物排放标准》(GB 4915—2004)已不能满足我国对水泥工业大气污染物排放控制的要求，需尽快修订，而且钢铁和化工等典型耗煤行业的大气污染物排放标准仍欠缺，亟待出台。因此，为促进能源结构调整，提高煤炭开发利用技术水平，约束煤炭消费，需要完善典型耗煤行业排放标准体系，逐步实现主要排放源全覆盖。并且，鼓励环境空气质量超标的地区制定严于国家标准的地方大气污染物排放标准。

6.2 健全管理制度，落实煤炭消费总量控制任务

6.2.1 建立区域煤炭消费总量控制制度

我国能源结构以煤炭为主，在只有单位 GDP 能耗下降控制目标和各级政府追求 GDP 增长的强力驱动下，无法约束煤炭消费总量的急剧增长。这对我国大

气污染物减排目标构成极大挑战，也使得能源和环境规划的目标屡次被突破。为加强环境保护、转方式调结构、节约能源资源和保证能源安全，有必要设立煤炭消费总量控制目标和科学分解煤炭消费总量，建立区域煤炭消费总量控制制度。需要综合考虑各地社会经济发展水平、能源消费特征、大气污染现状等因素，根据国家能源消费总量控制目标，研究制定煤炭消费总量中长期控制目标，严格控制区域煤炭消费总量。明确分解落实机制，把总量控制目标分解落实到各级政府。建立煤炭消费总量控制目标责任制，制定考核办法，加大考核和监督力度。建立煤炭消费总量预测预警机制，对煤炭消费总量增长较快的地区及时预警调控。

6.2.2 建立“倒逼”机制，促进发展方式转变

以节能减排为突破口，形成煤炭消费总量“倒逼”机制，抑制区域煤炭消费总量的增长。依据国家产业政策的准入要求，提高“两高一资”行业的环境准入门槛，严格控制新建高耗能、高污染项目；把污染物排放总量作为环评审批的前置条件，以总量定项目，严格控制污染物新增排放量；在重污染地区实施特别排放限值，新建火电、钢铁、石化、水泥、有色、化工等重污染项目必须满足大气污染物排放标准中特别排放限值要求；增加电力、冶金、建材和化工等典型耗煤行业能耗考核指标。

6.3 运用经济政策，促进能源行业清洁发展

在我国现行政策和管理机制下，能源开发和使用付出的成本远小于获得的收益，导致环境破坏严重。应探索将生态破坏与环境污染损失纳入能源定价机制，实施有利于节能减排和清洁能源发展的价格、财税和金融政策，促进能源可持续发展。

6.3.1 改革能源价格机制

在我国现行政策和管理机制下，能源价格没有完全反映资源稀缺性、不可再生成本和环境治理成本，能源价格特别是终端能源价格偏低，容易引发能源资源过度开采、浪费使用和低效率配置，并推动产业结构向高耗能方向发展。必须统

筹国家能源安全和市场效率，充分发挥价格杠杆对市场供需的调节作用，稳步推进能源价格改革，促进清洁能源发展和能源高效集约利用。

（1）实现煤炭生产利用全过程外部成本内部化

我国煤炭和煤电价格由于没有计入环境污染的外部成本，对其他能源的发展产生了明显的挤出效应。需要改革成本核算政策，将煤炭资源有偿使用费、安全生产费用、生态环境保护与治理恢复费用、煤矿转产资金、职业健康费用，按照一定的渠道列支到煤炭成本中，实现外部成本内部化。

（2）出台清洁能源价格扶持政策

可再生能源产品开发费用高，由于激励性定价机制不健全，使我国新能源和可再生能源的开发明显处于劣势。要加快推进能源定价机制改革，完善风能、太阳能发电等可再生能源价格形成机制，实行合理可行的补偿分摊政策，促进清洁能源发展。

（3）严格执行高耗能产业差别电价政策

按照国务院批准的《产业结构调整指导目录》，严格执行淘汰类、限制类、允许和鼓励类产业差别电价政策，遏制高耗能产业盲目发展、促进产业结构调整和技术升级。进一步扩大差别电价的实施范围，在对电解铝、铁合金、电石、烧碱、水泥、钢铁、黄磷、锌冶炼等 8 个行业实行差别电价的基础上，继续扩大实施范围。差别电价的额度要进一步提高，将淘汰类企业电价提高至目前高耗能行业平均电价的 1.5 倍水平，甚至更高。

（4）继续推行环保电价政策

“十一五”期间，脱硫电价政策的出台是推动我国火电行业脱硫设施大规模建设发展的主要推动力之一。与排污收费等政策相比，环保电价政策具有更强的刺激功能和可操作性。为进一步控制电力行业氮氧化物和烟尘排放，应加快研究出台脱硫、脱硝、除尘一体化的综合电价政策。

6.3.2 完善财税金融政策

国际上经济发达国家通常都通过诸多财税政策来鼓励发展清洁能源和提高能源效率。我国目前尚未形成有利于能源科学发展的财税政策体系，现有财税政

策中，资源环境税种少、税率低。我国与能源环境相关的主要税种，碳税还未出台，资源税、消费税及排污费的费率过低，不能弥补能源资源浪费和环境污染的外部成本，不能形成有利于环境保护的引导机制。在财政政策方面，国家加大了对能源开发的财政支持，但对节能没有足够的重视，在政府经常性支出结构中，尚未安排节能支出科目，对新能源与可再生能源建设项目缺少必要的财政政策和税收优惠支持。

（1）完善现有污染税费政策

污染税（费）的作用是将环境污染和生态破坏的外部成本通过征税或收费的方式将其内部化，促进污染物减排，保护生态环境。我国现行的排污收费制度存在许多不足之处：一是征收范围窄，不能覆盖主要污染物；二是征收标准偏低，不能弥补减少排放所需要的治理投入，对行为主体产生逆向调节。完善污染税费政策，一是要提高排污收费标准，二是逐步扩大排污费的征收范围，由二氧化硫、氮氧化物扩展到尘、重金属等其他污染物排放收费。

（2）开展煤炭消费税试点

现行消费税在环境保护上主要是通过调控能源消费中占较低份额的石油产品或其互补产品（摩托车、小汽车）来实现，由于没有将煤炭这一主要能源消费主体纳入征税范围，其环境保护的效果并不突出。鉴于以三区十群为代表的重点区域大气污染严重，而燃煤是大气污染的主要来源，为扎实推进我国大气污染防治工作，切实改善环境空气质量，在重点区域条件较好的地区开展煤炭消费税试点，通过税收政策调控煤炭消费总量。

（3）实行综合财税政策

由于技术、市场、成本等原因，目前我国新能源和可再生能源的生产规模小、技术落后、发展缓慢。需要实施优惠的投融资政策，综合运用财政补助、财政贴息、税收优惠等多种手段，增大在节能、可再生能源发展、能源科技创新等方面的投入。同时，要出台具有操作性的可再生能源发电强制性市场配额规定，促进可再生能源的发展。

6.3.3 推广节能环保发电调度

全面推行节能环保发电调度，不同类型的发电机组按照“可再生能源—核电

“天然气发电—燃煤发电—燃油发电”的优先顺序进行电力调度；同类型火电机组按照机组能耗和污染物排放水平由低到高排序，促使煤耗低、污染小的先进机组多发电，降低电力行业煤炭消耗和污染物排放的总体水平。

参考文献

- [1] 中国工程院. 中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究报告. 2012.4.
- [2] 中国环境与发展国际合作委员会课题组. 煤炭可持续利用与污染控制政策研究报告.2009.11.
- [3] 中国能源中长期（2030、2050）发展战略研究.科学出版社, 2011..
- [4] 严刚.环境空气质量约束下珠江三角洲能源消费模式研究. 环境科学学报.2011, 31(7): 1493-1500.
- [5] 王金南、陈潇君、宁淼等. 中国中长期能源发展的环境挑战与战略对策.中国工程科学, 2011, 13(6): 19-24.2
- [6] BP. 2011, 2011 年 BP 世界能源统计年鉴.
<http://www.bp.com/statisticalreview>, 2011-12-18 访问。
- [7] Brimblecombe, P. 2007. The clean air act after 50 years. Weather. 61(11), 311-314.
- [8] Williams, M. 2004. Air pollution and policy, 1952–2002. Science of the Total Environment, 334-335, 15-20.
- [9] U.S. Energy Information Administration, 2011, U.S. Coal Consumption by sector. <http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/xls/stb0703.xls> , 2011-10-19 更新 , 2011-12-18 访问。
- [10] 日本经济产业省资源能源厅(2011), 《2011 能源白皮书》 ,
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2011energyhtml/index.html>
- [11] 日本环境省 《环境统计集》,
<http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/index.html>.
- [12] 科学发展的 2030 年国家能源战略研究报告, 2009.
- [13] 周大地. 节能优先能源战略的经济学讨论.中国工程科学, 2011, 13(6): 11-17.
- [14] 麻林巍等. 对我国中长期（2030、2050）节能发展战略的系统分析. 中国工程科学, 2011, 13(6): 25-29.
- [15] 屈国俊.美国、日本的能源战略分析及对我国的借鉴[J]. 经济问题, 2011, (11):51-54.
- [16] 于培伟.美日欧能源战略调整走向及其启示[J]. 国际经济合作, 2006, (3): 28-31
- [17] 姜亦华.日本节约能源的成效、经验及启示[J]. 特区经济, 2007, (10): 90-91.
- [18] 孔宪丽.中国煤炭消费与影响因素动态关系的实证分析-兼论煤炭消费的非

对称价格效应[J]. 2010, 32(10): 1830-1838.

[19] 严祯荣等.燃煤粉工业锅炉的发展前景及节能减排技术创新[J]. 节能技术, 2010, 28(159): 65-71.

[20] 许瑞林.重视与控制煤炭消费改善江苏环境质量[J]. 能源研究与利用, 2003, (3): 12-15.

[21] 张瑞等.中国产业结构变动对能源强度的影响[J]. 统计与决策, 2007, (10): 73-74.

[22] 周密等.我国能源产业与产业结构相关性探讨[J]. 改革与战略, 2008, 24(11): 159-164.