

煤炭的真实成本

(草稿-非正式版)

撰稿人：清华大学 滕飞

能源是经济的血液，现代经济的发展离不开能源。近年来随着我国经济的高速发展，能源生产和消费量也快速增加。我国能源消费总量已由 2001 年的 15 亿吨标煤快速增长到 2013 年的 36.2 亿吨标煤，年均增速高达 8%。虽然能源为经济的发展提供了动力，但由于我国的能源消费总量巨大、能源生产与利用方式粗放，以及以煤为主的能源结构短期难以改变，快速增长的能源生产和消费也产生了严重的环境和生态问题。2012 年全国二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘排放量分别高达 2117.6 万吨、2337.8 万吨、1234.3 万吨。其中大部分排放集中在电力热力生产供应业、燃煤锅炉、非金属矿物制品业和黑色金属冶炼业等重点煤炭消费行业，上述行业二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘排放量约占全国排放总量的 90%、70%和 80%。此外化石燃料尤其是煤炭的消费还是大气中 PM2.5 的主要来源，而 2012 年发布的《全球疾病负担报告》指出室外空气污染是我国第四大致死因素，化石能源尤其是煤炭使用的环境和健康成本不容忽视。本报告以 2012 年的数据为基础，对煤炭开采、运输和使用过程中对水、生态、环境和人体健康的影响进行了量化的分析（表 1），并在此基础上进一步货币化了这些影响，计算了煤炭使用所产生的环境和健康成本。

表 1 本研究量化及货币化煤炭外部损害成本的主要领域

	煤炭开采	煤炭运输	煤炭转化	煤炭利用
煤矿资源	量化、货币化			
水环境	量化、货币化		量化、货币化	量化、货币化
生态系统	量化、货币化	量化、货币化		
大气环境			量化、货币化	量化、货币化

			模型分析	模型分析
人体健康	量化、货币化		量化货币化	量化货币化
			模型分析	模型分析
温室气体	量化	量化	量化	量化

除了环境和健康成本之外，化石燃料及煤炭利用过程排放的二氧化碳等温室气体还会加剧气候变化，在长时间尺度上对生态系统和人类健康产生影响。本报告也估计了煤炭开采、运输和利用过程中温室气体的排放，但由于国内缺少对二氧化碳“社会成本”的研究，本报告并未将由于气候变化产生的长期外部成本进行货币化。

与体现供需关系的经济成本不同，相当部分的环境和健康成本并没有体现在目前的定价机制中，因而是“隐藏”在价格之后的“真实成本”。由于这部分成本并没有体现在定价机制中，因而企业和居民在使用化石能源时也就不会考虑其对环境和健康的损害，进而导致市场失效和化石能源的过度使用。本研究的目的是揭示这部分隐藏的真实成本，为制定更合理的能源资源定价机制提供分析基础。

1. 煤炭生产的环境及健康影响

水资源

水资源总量为当地降水形成的地表和地下产水量，即地表径流量与降水入渗补给地下水量之和。根据 1956~2000 年同步资料系列计算，全国水资源总量为 28412 亿 m³，其中地表水资源量为 27388 亿 m³，地下水资源量 8218 亿 m³，地表水资源与地下水资源量重复计算量 7194 亿 m³。从地区分布上看，我国水资源总量南方多、北方少，山区多、平原少。北方地区水资源总量约为 5267 亿 m³，占全国的 19%，南方地区为 23145 亿 m³，占全国的 81%。在综合开采地质条件、主体采煤技术、实际灾害状况、市场供给能力和行政区划等因素考虑下，将全国煤炭生产区域划分成晋陕宁蒙甘区、华东区、东北区、华南区和新青区 5 大产煤区域。其中，晋陕蒙宁甘区包含山西、陕西、内蒙古、宁夏和甘肃五省区；华东区包含河北、山东、安徽、江苏、江西、福建和河南等产煤省，以及北京、天津、上海和浙江等非产煤省市；东北区包含辽宁、吉林、黑龙江三省；华南区包含湖北、湖南、广西、云南、贵州、四川和重庆市等产煤省（市、

区)，以及广东和海南等非产煤省；新青区包括新疆自治区和青海省。全国水资源量按五大区域划分情况见表 2 所示。

表 2 五大区域水资源量 单位: 亿 m³

五大区域	降水量 (亿 m ³)	地表水 (亿 m ³)	地下水资源量 (亿 m ³)		水资源总量 (亿 m ³)
			资源量	其中不重复量	
全国	61786	27375	8219	1037	28412
晋陕蒙宁 甘区	6748	1153	585	211	1365
华东区	12709	5254	1774	476	5732
东北区	4558	1332	535	218	1551
华南区	25336	13156	3418	53	13209
新青区	4629	1400	785	61	1461

从表 2 可看出，在水资源总量方面，华南区水资源量远远高出其他四区，占全国水资源量 46.5%；其次是华东区，占 20.2%。其余三区较为相近且水资源总量较低，晋陕蒙宁甘区、东北区、新青区水资源总量分别占全国水资源总量的 4.8%、5.5%、5.1%。在降水量方面，华南区降水量最高，其次是华东区和晋陕蒙宁甘区，分别占全国降水量的 41%、20.6%、10.9%，东北区和新青区两区降水量较接近且较低，分别为全国降水量的 7.4%和 7.5%。在地表水量和地下水量方面，华南区最高，其次是华东区，分别占全国地表以及地下水资源量的 48.1%、19.2%和 41.6%、21.6%，其余三个区域地表及地下水量较接近。

由于自然地理、气候条件等客观因素的影响，中国水资源分布严重不均，煤炭资源和水资源呈逆向分布（见图 1）。从煤炭资源和水资源的整体分布来看，煤炭资源储量北多南少、西多东少，而水资源分布南多北少，大部分重点煤炭基地处于水资源供需矛盾较为突出的地区，水资源已对煤炭基地的建设产生了严重制约。正在建设的全国十四个大型煤炭基地，除云贵基地、两淮基地、蒙东（东北）基地水资源相对丰富外，其余的十一个基地都存在不同程度的严重缺水。尤其是晋陕蒙宁新等地区水资源最为匮乏，2010 年煤炭产量约 19.45 亿 t，占全国煤炭产量的 60%，水资源占有量不足全国总量的 20%。



资料来源：水资源公报，能源统计年鉴

图 1 地下水资源分布与煤炭开采的矛盾

煤炭开采过程对水资源的影响主要体现在矿井水的利用和排放方面。矿井水是煤炭开采过程中排出的水资源，其来源包括大气降水、地表水、地下水和生产废水等。矿井水中的污染物主要包括悬浮物、重金属、矿物质以及特殊污染物等。矿井水的资源化对防止水资源流失、避免水环境污染以及缓解供水不足等方面具有十分重要的意义。矿井水的利用途径主要包括矿区工业生产用水、矿区生态建设用水、生活用水及其他。

煤炭的开采造成地面塌陷，并且不间断、大规模挖煤形成的漏斗、水位下降以及水污染等对水资源形成极大的破坏。以山西为例，每开采 1 吨煤，破坏地下水动储量（通过垂直于流向的含水层断面的地下水）为 1.41 立方米，破坏地下水静储量（储存于地下水最低水位以下含水层中的重力水）为 1.07 立方米，合计为 2.48 立方米。每年因煤炭开采而破坏的地下水资源达到十几亿立方米，将加大缺水地区的水资源供需矛盾。

在消费侧，煤炭相关行业用水是二三产总用水量的重要组成部分。其中，电力、热力的生产和供应业占到二三产总用水量的 43.9%，属于高耗水行业；与煤炭消费关系紧密的其他行业，如化学原料及化学制品制造业、黑色金属冶炼及压延加工业、非金属矿物制品业、煤炭开采和洗选业、石油加工、炼焦及核燃料加工业等，均处于各行业水消费量排序的前列，见表 3。

表 3 分行业水消费总量

行 业	水消费总量(亿 m ³)	占二三产总用水量的比重(%)
电力、热力的生产和供应业	441.17	43.90
化学原料及化学制品制造业	50.35	5.01

黑色金属冶炼及压延加工业	34.21	3.40
纺织业	26.65	2.65
造纸及纸制品业	25.99	2.59
非金属矿物制品业	21.05	2.09
煤炭开采和洗选业	16.14	1.61
农副食品加工业	13.97	1.39
有色金属冶炼及压延加工业	11.53	1.15
非金属矿采选业	10.57	1.05
石油加工、炼焦及核燃料加工业	10.57	1.05

资料来源：第二次全国经济普查结果

煤炭开采造成的水环境污染是多方面的。开采形成的矿洞和矿坑水容易造成地下水污染，特别是岩溶比较发育的地区，对岩溶水的污染就更为明显。而煤炭开采过程中的煤矸石堆积，随着降雨地表径流的冲刷，造成地表水环境污染，进而造成地下水污染。洗煤水含有悬浮物、煤泥和泥砂等各种污染，未经处理直接排入河道容易造成地表水污染。煤矿在开采过程中，一些有害物质还会在河流底泥中沉积，河流底泥中各种污染物长时间释放同样又会影响水体的水质。

煤矿开采对地下水的污染分为直接和间接污染两种形式。煤矿开采造成含水层破坏或边界条件改变，产生人为导水通道，增大含水层间的水力联系。由于煤矿开采，煤层底板遭到破坏，矿坑中大量有害物质将通过地下水流迁移，污染深层岩溶水，称为直接污染。矿坑排水未经任何处理，排出井外，汇入地表水系，造成地表水的污染，进而污染地下水。浅层煤矿区大规模巷道开挖造成地表植被的破坏、岩溶塌陷、地面塌陷及裂缝等相应引起地表渗透条件变化，使得被污染的地表水对地下水的额补给加强，通过地表污水河渠侧方补给污染地下水，称为间接污染。

在煤矿开采过程中，产生大量的煤矸石。由于煤矸石含有 SiO_2 、 Al_2O_3 以及铁、锰、硫等常量元素，还有铅、锡、汞、砷、铬等微量重金属元素，在自然的风化过程中一些有害有毒元素会不断的释放出来，在大气降水的冲刷和淋溶作用下随地表径流进入水体，对周边溪流水质造成严重污染，并通过食物链等途径直接或间接地危害人类健康。大量矸石堆置地表，在自然风化和降雨作用下，矸石中污染元素不断析出，对周边的溪流及农田产生明显的污染。据统计，

2012 年我国煤炭开采产生煤矸石 5.6 亿吨，全国堆存 62 亿吨，占地约 2 万公顷。煤矸石堆存自然和缓慢氧化排放的二氧化硫约 110 万吨。

在废污水排放方面，与煤炭消费关系密切的行业，如化学原料及化学制品制造业，电力、热力的生产和供应业，黑色金属冶炼及压延加工业，煤炭开采和洗选业，石油加工、炼焦及核燃料加工业等，位于分行业废污水排放量的前列，见表 4。

表 4 分行业废污水排放量

行业	工业废水排放总量(万吨)	工业废水排放达标量(万吨)	排序
总计	2090300	1980075	
造纸及纸制品业	392604	367176	1
化学原料及化学制品制造业	297062	282138	2
纺织业	239116	230806	3
电力、热力的生产和供应业	149010	144573	4
农副食品加工业	143838	132050	5
黑色金属冶炼及压延加工业	125978	122036	6
煤炭开采和洗选业	80236	73665	7
饮料制造业	69674	65459	8
石油加工、炼焦及核燃料加工业	66406	63474	9
医药制造业	52718	51003	10
食品制造业	52699	48365	11

资料来源：第二次全国经济普查结果

另一个对水资源和水质有重要影响的行业是现代煤化工。传统煤化工指用于冶金行业的煤炭焦化和用于制取合成氨的煤炭气化，是高能耗、高排放和高污染的行业。煤化工发展的重点是现代煤化工，主要是煤经气化合成制气再深加工生成各种煤基能源化工品。煤气化是生产各类煤基化学品、煤基液体燃料、煤基低碳烯烃的关键技术。

据统计，我国目前共有处于不同阶段的煤制气项目约 50 个，计划生产规模约 2250 亿立方/年。其中已经投产的产能约 27 亿立方/年，建设中的产能 144 亿立方/年，开展前期工作项目的产能约 662 亿立方/年，计划中项目产能 637 亿立方/年，新批路条项目 780 亿立方/年。

有关资料显示，生产 1t 合成氨需耗新鲜水约 12.5m³，生产 1t 甲醇需耗新鲜水约 15m³，生产 1t 二甲醚需耗新鲜水约 15m³，直接液化 1t 油需耗新鲜水约 7m³，间接液化 1t 油需耗新鲜水约 12m³，间接液化 1t 油所耗的新鲜水约为 12m³。我国煤炭资源与水资源呈逆向分布，如山西、陕西、内蒙、宁夏等地区的煤炭资源占有量为国内已探明储蓄量的 67%，而水资源仅占全国总量的 3.85%。目前这些地区正在掀起建设煤化工基地的高潮，水资源的严重匮乏，已经成为制约煤化工行业发展的重要因素。

目前，国内设计的煤化工废水处理系统，基本沿袭以往的经验，没有区别对待或综合考虑煤化工废水中各种污染物的降解规律，不能基于达标要求确定合理的设计参数，来实现经济、有效的水处理目标。煤化工企业排放污水以高浓度煤气洗涤污水为主。污水中 COD 一般在 5000mg/L 左右、氨氮在 200~500mg/L，污水所含有机污染物包括酚类、多环芳香族化合物及含氮、氧、硫的杂环化合物等，是一种典型的含有难降解的有机化合物的工业污水。

生态系统

煤炭开采破坏了地壳内部原有的力学平衡状态，引起地表塌陷、原有生态系统受到破坏。这种破坏使原有土地收益的减少或丧失，同时也造成地表水利设施的破坏和生态环境恶化。我国煤炭生产约 94%为井工开采，当前煤炭开采产生的地表沉陷问题越来越严重。据调查，目前我国每采出 1 万吨煤炭的地表沉陷就多达 2666.67m²，按照我国煤炭年产量 30 亿吨计算，每年就有 800km² 土地遭到破坏。地表沉陷带来的破坏已经涉及到了工业、农业、交通运输、环境保护、生态平衡等各方面，是亟待解决的地质环境问题。

煤炭资源的开发，导致地下水层遭到了破坏、大量地下水漏失，使地下水位大幅度下降。这种变化使地表植被受到严重破坏，一方面加大了水土流失，使环境恶化；另一方面由于地表无植被，减少了降水在该区域的渗漏量，加大了洪水流量，降低了地下水的储蓄能力。煤矿开采导致植被破坏，致使固定、半固定沙丘活化，裸土、裸岩增加，抗御大风、大旱和暴雨的冲击能力进一步降低，水土流失、土地沙漠化加剧，使脆弱的生态环境更加恶化。

煤炭开采还可能造成植被退化和土地沙化等生态问题。煤炭开采对植被生态造成不良影响，植被出现生长不良，叶面枯黄、沙生灌丛枯萎或消失的现象。这与煤矿开采出现的地面变形破坏，固体废弃物埋压等有关。煤炭资源的开发，导致含水层和隔水层均遭到了破坏、疏干，打破了地下水的循环规律，大量地

下水漏失，使地下水位大幅度下降，泉水枯竭。这种变化对于区内植被的生长发育产生了巨大的影响，使地表植被受到严重破坏。其结果：一方面加大了水土流失，使环境恶化；另一方面由于地表无植被，减少了降水在该区域的渗流量，加大了洪水流量，降低了地下水的储蓄能力。煤矿开采导致植被破坏，致使固定、半固定沙丘活化，裸土、裸岩增加，抗御大风、大旱和暴雨的冲击力进一步降低，水土流失、土地沙漠化加剧，使脆弱的生态环境更加恶化。

煤矿资源浪费

我国煤炭资源储量较丰富，但由于自然和人为两方面因素，我国的煤炭资源回收率整体水平低下。我国煤炭赋存地质结构复杂，资源开采条件属中等偏下，将近50%的储量处于地质构造复杂和高瓦斯地区；另一方面，由于煤炭产业市场集中度过低造成市场竞争激烈，加上煤炭资源管理工作滞后、回采率统计不重视、监管部门无法对全过程进行实施监督，导致了煤炭企业放弃回采率，一位追求短期利益。

2005年，国土资源部、国家发展和改革委员会对全国煤矿资源回采率做了一次普查。普查结果：2004年，全国煤矿平均采区回采率为64%，平均矿井回采率为46%。按矿井规模划分，大型煤矿矿井回采率48%，中型煤矿43%，小型煤矿41%。但是《2007 中国能源发展报告》中指出，我国煤炭平均资源回采率（也即矿井回采率）为30%，低于2004年普查统计结果46%。而美国、澳大利亚、德国、加拿大等发达国家的煤炭资源总体回收率能达到60%至70%；不论是2004年还是2007年的统计结果均显示，我国的煤矿资源回收率低于世界先进水平。

除了整体水平低下，我国煤炭回采率在不同规模企业和地区间也存在很大的不平衡。与大型煤矿相比，由于机械化程度较低并缺乏先进的管理制度，我国小煤矿的回采率仅在15-20%左右，远远低于国有煤矿（一般在50%至60%）。根据统计，2007年山西省煤炭平均资源回采率在40%左右，而该省的乡镇煤矿回采率仅为10%~20%，资源浪费严重。另外，由于地理位置、历史因素、技术条件等原因的影响，我国西部地区煤矿回采率比东部更低，山西、陕西、内蒙古和新疆四省的平均采区回采率为58%，比东部地区和南方地区的平均采区回采率低14%，而西部小型矿山回收率更低。据估计，在现有技术条件下，2012年我国通过提高煤矿资源回收率可以多产原煤至少7000万吨。

虽然国家开征资源税时也考虑了煤炭企业级差收益，设计了浮动税额，但在实际执行中，向重点煤矿征收的资源税高于国有地方煤矿，地方煤矿高于乡镇煤矿，这与它们的资源回收率正好相反，对低品位、劣质资源开发利用缺乏政策导向。这种征收方法忽视了煤炭资源开采回收率，从而导致采富弃贫、采易弃难、采大弃小的现象，没有充分反映由于资源条件不同而导致的开采收益的差别。

煤炭的不可再生性，提醒我们应合理开采，珍惜利用。一方面应通过技术途径提高煤炭开采率，更重要的是建立和完善煤炭开采率监管体系，通过真正反映极差收益的浮动资源税率，调整有关煤炭节约利用方面的政策导向，实现对不同资源条件的合理充分利用。

人体健康

煤炭生产对人体健康的影响体现在两个方面：一是煤炭生产导致的人员死亡，二是由于煤炭生产导致的职工职业性损伤，如尘肺病等。

2013年全国煤矿共发生各类事故604起、死亡1067人，同比分别下降175起、317人，下降22.5%、22.9%。其中，重特大事故14起、245人，同比分别下降2起、28人，下降12.5%和10.3%；较大事故46起、224人，同比分别下降25起、127人，下降35.2%和36.2%，煤矿百万吨死亡率降到0.288，同比下降23%，首次降到0.3以内（见图2）。

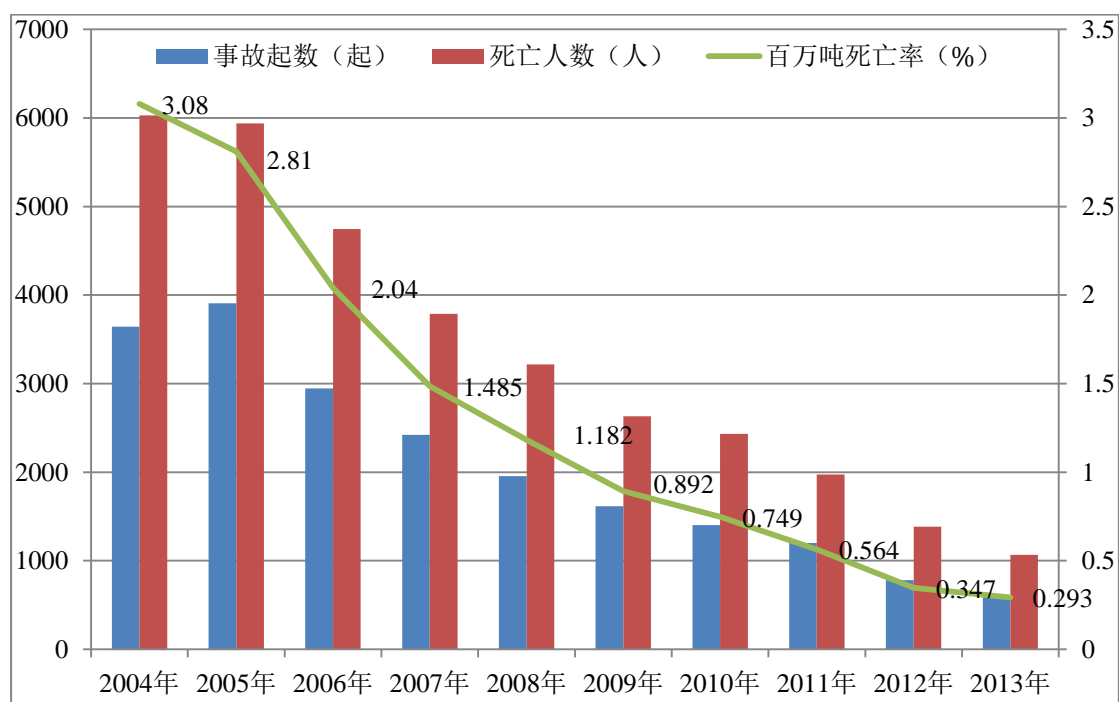


图2 2004-2013年全国煤矿事故起数、死亡人数与百万吨死亡率变化

资料来源《2014中国煤炭工业发展研究报告》

我国煤矿企业众多，从业人员数量较大，职业危害严重，其中以粉尘危害最为突出。我国煤炭行业职工职业性损伤主要表现为尘肺病，尘肺病也是我国目前最严重的职业病，每年新增尘肺病病例一万例以上，其中煤炭行业尘肺病病例约占全国尘肺病患者总数的50%。煤炭行业由尘肺病引发的矿工伤亡人数，远远高于各类工伤事故伤亡人数的总和。据卫生部门统计，新中国成立至2012年末，全国累计报告职业病807269例，其中，累计报告尘肺病72148例，死亡

150643 例，现患 576505 例；累计报告职业中毒 50851 例。其中 2012 年我国共报告尘肺病新病例 24206 例，占职业病总例数的 88.27%，95.01% 的病例为煤工尘肺和矽肺，分别为 12405 例和 10592 例，54.52% 分布在煤炭行业。尘肺发病工龄有缩短的趋势，超过半数的病例分布在中、小型企业。

2. 煤炭运输的环境与健康影响

交通运输外部成本主要包括噪声、运输过程中产生的空气污染、运输的事故成本等。运输的事故成本包括交通事故经济损失，这部分损失除了事故造成的直接车辆、人员和物质损失，也包括由于事故造成的社会机构服务损失和交通延误损失等间接损失。交通运输工具产生的噪声是环境噪声污染的主要噪声源之一，约占城市噪声的 70%。噪声除了干扰睡眠、损伤听力外还会对人体健康产生多种不良影响。而交通运输过程中还向大气中排放烟尘和有害气体，对人体健康造成损害。这些污染物的种类与交通运输工具的类型与燃料密切相关。下表总结了不同运载类型下交通运输的外部环境成本。

表 5 不同运输方式下的外部环境成本

	公路	水运	铁路
安全成本（分/tkm）	11.42	0.09	0.3
噪声成本（分/tkm）	0.89	0	0.38
空气污染成本（分/tkm）	1.80	0.30	0.24
合计（分/tkm）	14.11	0.39	0.92

来源：《中国交通运输系统外部成本计算理论与方法研究》，2010，邸晶

在此基础上，本研究按公路平均运距 180 公里、铁路平均运距 650 公里及水路运输 1800 公里测算煤炭运输的环境外部成本。

3. 煤炭消费的环境与健康影响

环境影响

从煤炭消费的行业分布来看，电厂锅炉、工业锅炉、煤化工（炼焦等）以及建材窑炉消费了我国超过 90% 的煤炭量。我国 2012 年主要煤炭消费部门的煤炭消费比例如图 3 示。2012 年全国煤炭消耗量 35.3 亿吨，其中电厂锅炉是第一用煤大户，占全国煤炭消费总量的 51.%。其次为工业锅炉、煤化工（炼焦等）以及建材窑炉等，占全国煤炭消费总量的比例依次为 21%、15% 和 7%。

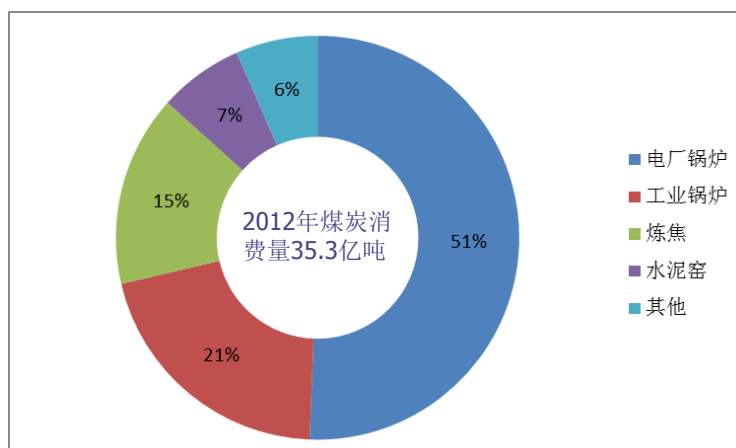


图3 2012年我国煤炭消费行业分布

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。从污染物排放部门来看，2012年二氧化硫排放主要集中在电力热力生产、燃煤锅炉、黑色金属冶炼业，分别占全国排放总量的38%、23%、11%；氮氧化物排放主要集中在电力热力生产、机动车、非金属矿物制品业、燃煤锅炉，分别占全国排放总量的48%、30%、13%、11%；烟粉尘排放主要集中在燃煤锅炉、电力热力生产、非金属矿物制品业，分别占全国排放总量的27%、11%、12%。可见，我国煤炭消费及大气污染物排放大量集中于电力热力生产、燃煤锅炉、非金属矿物制品业和黑色金属冶炼业等。与电力行业相比，工业锅炉除尘、脱硫、脱硝等烟气治理设施同步配套率较低，运行管理水平落后，是造成我国煤烟型大气污染较为严重的主要原因之一。各主要污染物排放行业单位煤炭消费二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘排放强度见表6。

表6 重点行业单位煤炭消费污染物排放强度 (kg/吨)

	二氧化硫	氮氧化物	烟粉尘
电力、热力生产供应业	3.95	5.05	1.11
黑色金属冶炼	7.86	3.18	5.92
水泥熟料生产	1.48	8.83	2.99
焦化	1.07	0.44	1.19
燃煤锅炉	11.05	4.00	4.05

从污染物排放的地区分布来看，京津冀地区、山东、河南、安徽以及长三角区域的煤炭消费量与污染物排放量均较大。2012年，九省市以占全国9.2%的区域

面积，消费了全国 38.2%的煤炭，排放了全国 33.3%的二氧化硫、39.6%的氮氧化物和 31.8%的烟粉尘，重点地区单位面积煤炭消费量为全国平均水平的 4 倍，其中上海市单位面积煤炭消费量最大，为 9kg/m²。重点地区单位面积大气污染物排放量为全国平均水平的 2 倍左右，特别是上海，单位面积二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘排放强度分别为全国平均水平的 14 倍、23 倍和 9 倍。2012 年重点地区单位面积煤炭消费见图 4。2012 年重点地区单位面积污染物排放见图 5。

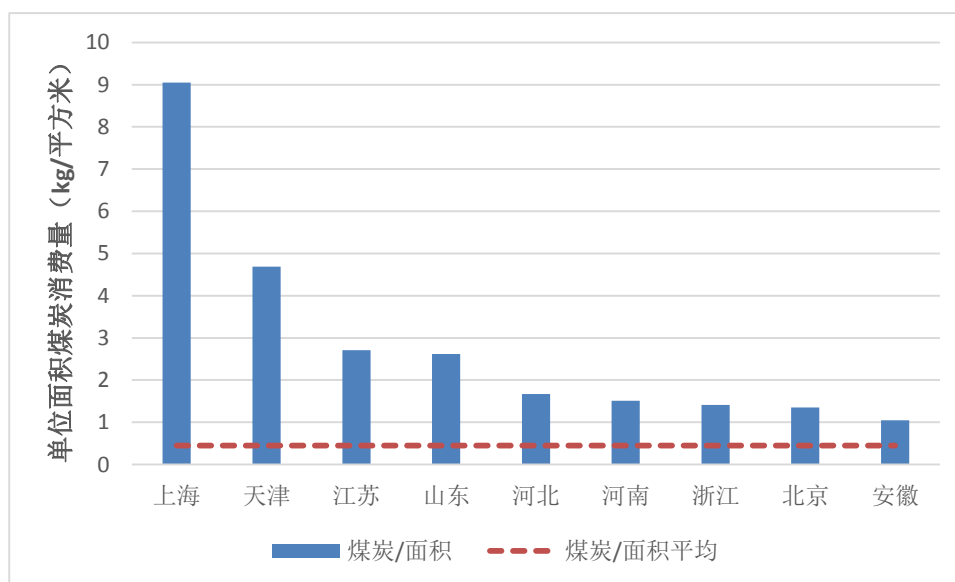


图 4 2012 年重点地区单位面积煤炭消费情况

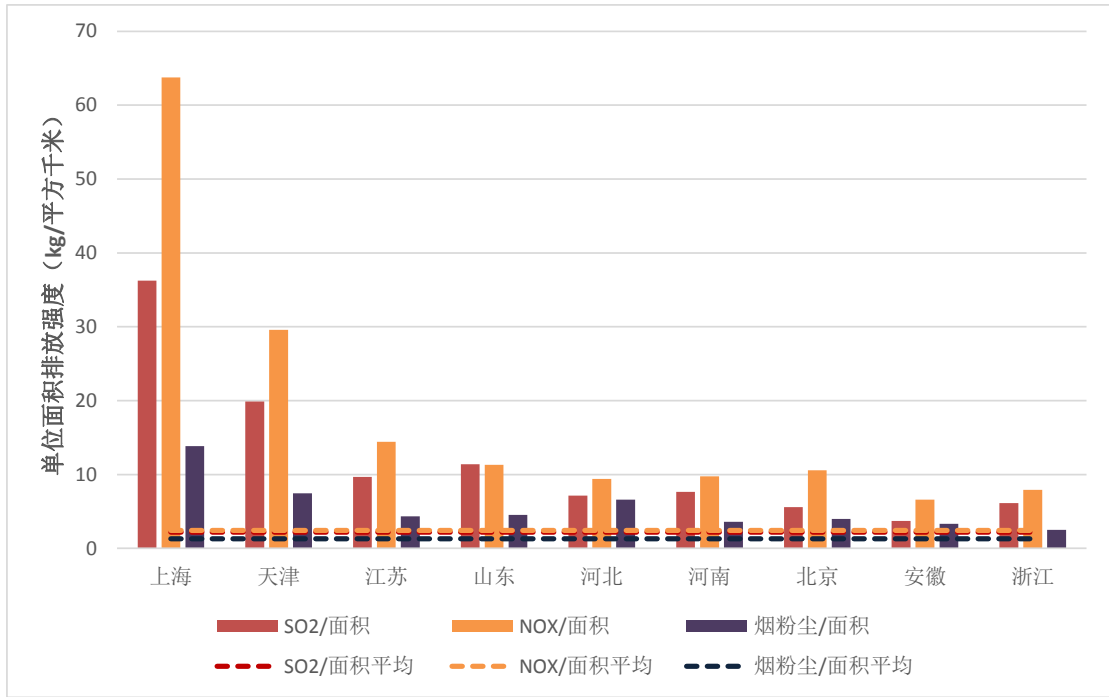


图5 2012年重点地区单位面积污染物排放情况

从单位煤炭消费量的污染物排放强度来看，重点地区氮氧化物排放强度显著高于全国平均水平，二氧化硫、烟粉尘排放强度一般低于全国平均水平。重点地区二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘排放强度见图6。

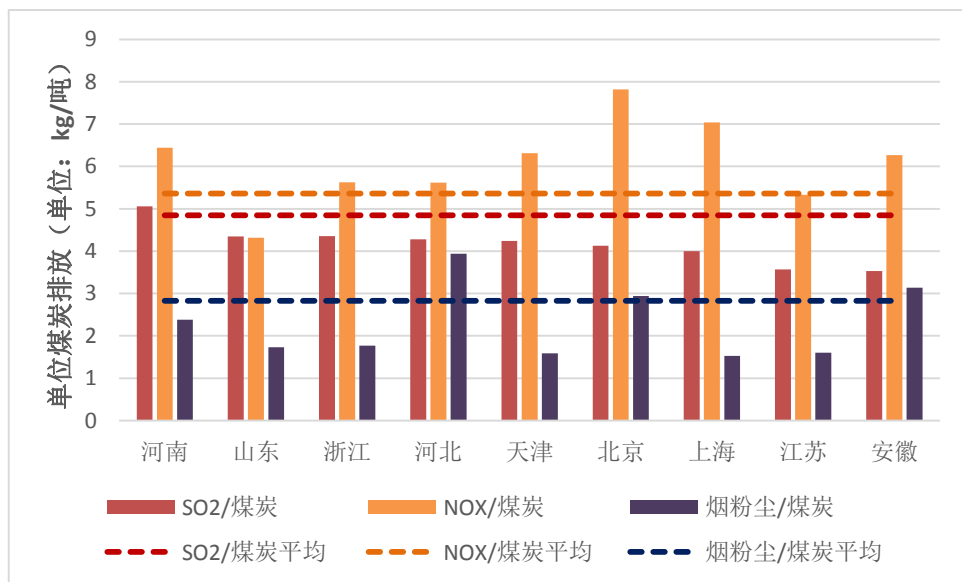


图6 重点地区二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘排放强度

煤炭消费导致二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘在重点行业和重点区域集中排放，严重影响了空气质量。我国PM2.5污染严重区域主要集中在煤炭消费量大、经济发达的京津冀、长三角、山东半岛、成渝地区、武汉及周边城市群、长株潭

城市群以及河南省和安徽省等区域。按照《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准,2010年全国约有175万平方公里国土面积PM2.5年均浓度不达标,占到国土总面积的18%,超标区域PM2.5年均浓度达到61.31 μg/m3。

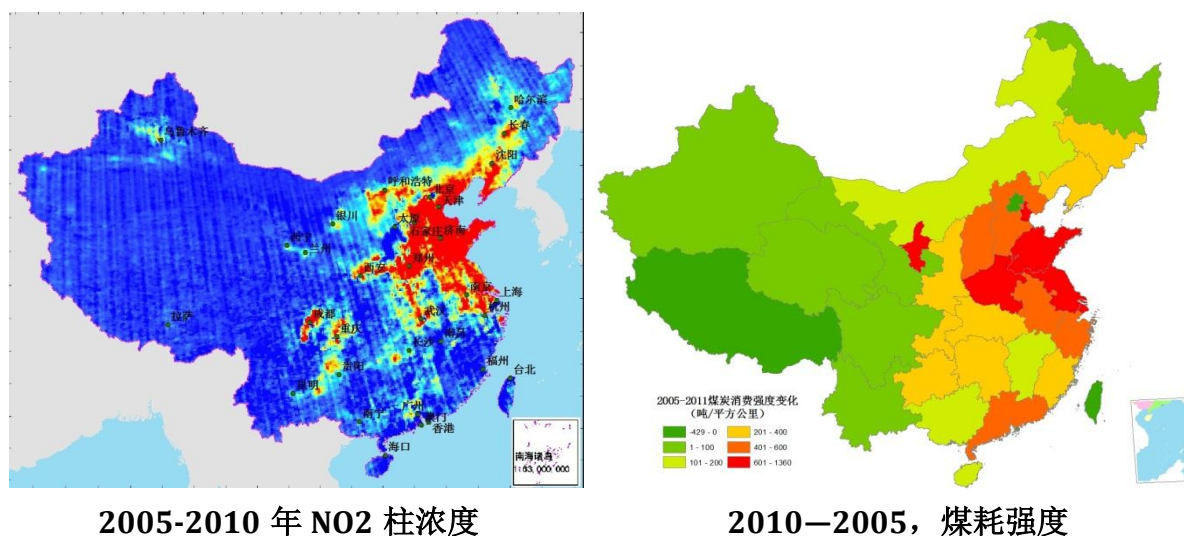
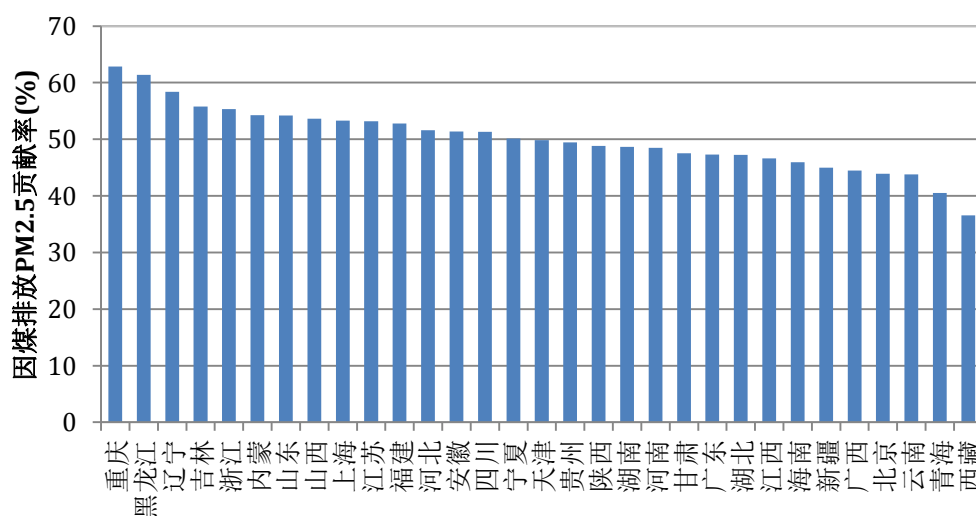


图 7 煤炭消费与空气质量高度相关

煤炭燃烧产生的二氧化硫、氮氧化物及烟粉尘均会促进 PM2.5 的形成,排放到大气中污染物,经过干湿沉降、化学氧化等物理化学过程和空间传输形成 PM2.5 等二次污染物。利用空气质量模型模拟煤炭消费产生的大气污染物在空气中的物理化学转化过程及空间传输,结果表明 2012 年煤炭消费对全国 PM2.5 年均浓度的平均贡献为 51%,对全国 SO2 年均浓度的平均贡献为 66%,对全国 NO2 年均浓度的平均贡献为 52%。就各省来看,煤炭消费对各省 PM2.5 年均浓度的贡献有较大差异,贡献范围为 37%~63%,煤炭消费对 PM2.5 贡献较小的省份为西藏、青海、云南、北京,煤炭消费对 PM2.5 贡献较大的省份为黑龙江、重庆、辽宁、吉林、内蒙古。



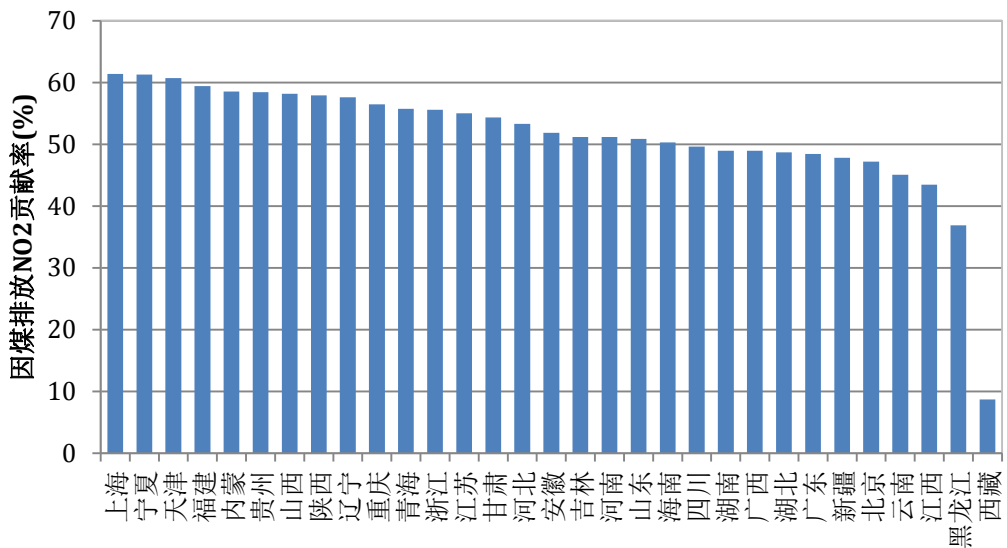
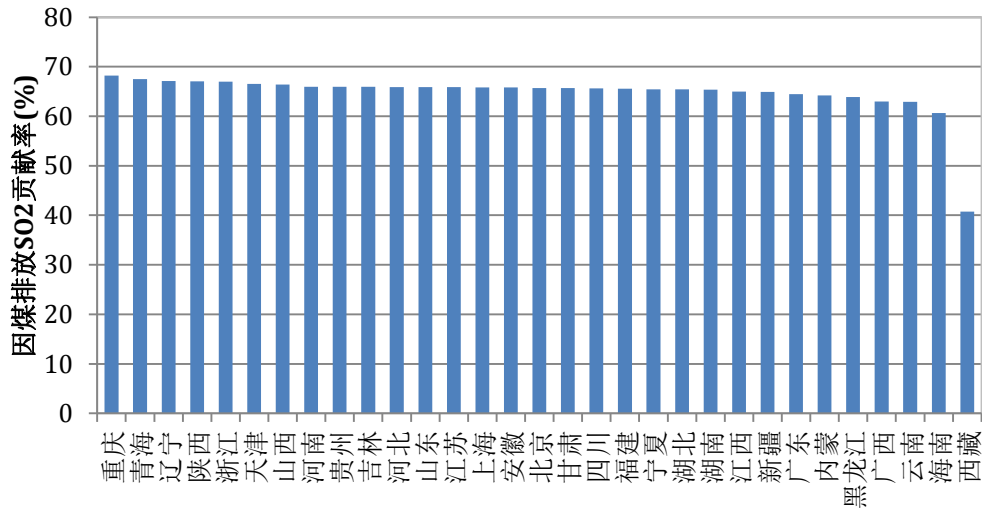


图8 各省市因煤排放 PM2.5、SO2、NO2 贡献率

由于各省煤炭消费量存在较大差异，加上末端治理措施及去除效率也存在较大差异，煤炭消费对全国各地 PM2.5 的贡献存在较大差异，总体来说，经济欠发达地区由于工业发展水平低，煤炭消费量较小，这些区域煤炭燃烧所产生的大气污染物所占的比重较小，煤炭消费对其 PM2.5 贡献相对较小；而对所有省市来说，绝大部分 SO2 均为煤炭燃烧所排放，在 SO2 的贡献率上，各省之间差异很小；而对于 NO2 浓度，NOx 除了来自煤炭燃烧以外，机动车排放占了一定的比例，而各省市由于机动车保有量、尾气治理水平、燃油品质等不同而导致煤炭消费排放 NOx 比例差异较大，因此煤炭消费对 NO2 浓度贡献也存在较大差异。各省煤炭消费对 PM2.5、SO2 及 NO2 贡献见图 8 所示。

从 PM2.5 年均浓度空间分布上来看，污染严重区域都集中在京津冀、长三角、成渝城市群及长江中下游城市群。因煤排放对 PM2.5 浓度贡献较大的区域主要集中在东北、华北、华东及成渝区域，而中部地区及华南地区贡献相对较小。

此外煤炭消费还是大气汞排放的主要来源。我国是煤炭消费大国，水泥生产、有色金属冶炼等行业占国民经济的比重较大，因此我国源自无意排放的大气汞数量较大。而且，我国是汞的使用大国，汞的使用过程也增加了我国大气汞负荷。此外，我国自然源大气汞排放量也不容忽视。大量的汞排放势必导致大气汞沉降的增加，而沉降后汞的再释放也可能是大气汞的主要来源。上述因素都是导致我国大气汞排放量巨大的原因。根据 2013 年 UNEP 的评估报告，2010 年我国人为源大气汞排放量为 650 吨左右，占全球总排放量的三分之一，是全球人为源大气汞排放量最大的国家。但值得注意的是，随着我国对大气常规污染物烟尘、二氧化硫和氮氧化物治理力度的不断加大，除尘、脱硫、脱硝措施对汞起到了一定的协同减排作用。与 2005 年相比较，2010 年我国人为源大气汞排放量下降了 21%。

我国大气汞排放主要集中在燃煤、水泥制造、有色金属冶炼、生活垃圾焚烧、钢铁冶炼、石油燃烧等行业。目前我国尚无人为源大气汞排放量的权威发布数据，根据估算，燃煤是最主要的排放行业，其次为水泥生产、有色金属冶炼和生活垃圾焚烧，这四类行业的大气汞排放占我国人为源汞排放总量的比重分别为 55.0%、13.1%、11.8%、11.3%，累积占比约为 91.2%。按照 2010 年我国人为源大气汞排放量 650 吨，燃煤消费总量为 31.2 亿吨，我国 2010 年单位燃煤大气汞排放强度为 0.11g/t 煤。2010 年我国人为源大气汞排放行业分布见图 9。

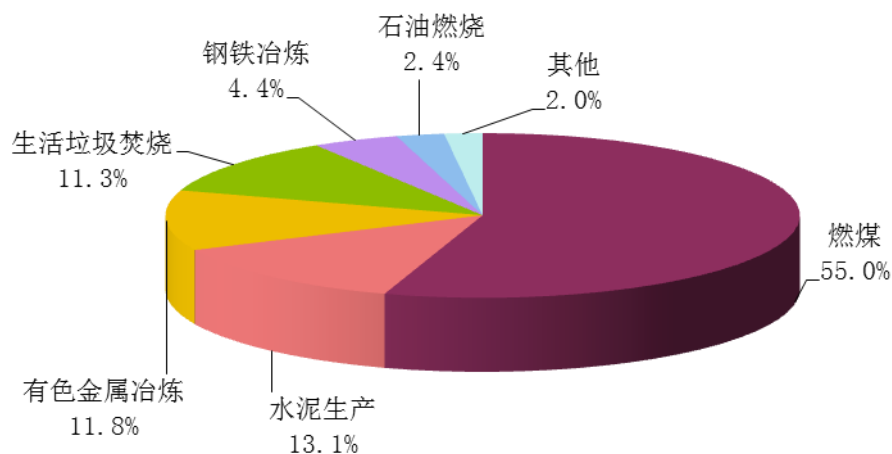


图 9 2010 年我国人为源大气汞排放行业分布

人体健康

S02 在以煤为主要能源的发展中国家作为主要大气污染物，其健康效应备受关注。在中国 17 个城市的研究表明，S02 浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，人群全死因死亡率、心血管疾病死亡率和呼吸系统疾病死亡率分别增加 0.75%、0.83% 和 1.25%。在美国的研究表明，S02 浓度每增加 4ppb，人群全死因死亡率增加

6.9%。澳大利亚布里斯班的研究也表明，SO₂年平均浓度每增加1ppb，呼吸循环系统疾病死亡率增加4.7%。另有罗马尼亚、中国上海、兰州市的研究表明随着大气中SO₂浓度的增加，呼吸系统疾病、心脑血管疾病的入院率也相应增加。SO₂呼吸进入人体后，可对人体产生多种毒害作用。

NO₂除对人体直接的危害之外，还是室外空气发生光化学烟雾的前体物，在强烈阳光照射下，与可烃类物质相互作用，发生一系列光化学反应，产生强氧化性的光化学烟雾，对眼、呼吸道有明显的刺激性，并增加过敏原的敏感性，对患有心脏病和肺部疾病的人群影响更为明显。对意大利10城市进行的病例交叉研究表明，NO₂浓度每增加10 μg/m³，居民的总死亡率、心血管系统疾病死亡率、呼吸系统疾病死亡率分别增加2.09%、2.63%和3.48%。对中国17城市的研究也显示NO₂浓度升高对呼吸及心血管系统疾病死亡率有显著影响。

对人体健康影响较大的颗粒物主要是空气动力学当量直径在10 μm以下，能用鼻和嘴吸入的那部分，也称为可吸入颗粒物（PM₁₀）。可吸入颗粒物一般又可分为细颗粒（空气动力学直径小于等于2.5 μm）和粗颗粒（介于2.5 μm和10 μm之间）。空气动力学当量直径小于2.5 μm（PM_{2.5}）的颗粒物称为细颗粒物，主要由燃烧过程产生，如煤炭燃烧、汽车尾气等。相较于PM₁₀，PM_{2.5}对人体健康危害更加明显。PM_{2.5}不仅是构成雾霾的主要元凶，对人体健康也有重要的影响。由于PM_{2.5}粒径很小，与PM₁₀或粒径更大的颗粒物比较，有更大的比表面积，这为一些化学物质、细菌和病毒提供了载体，携带重金属的能力也较强。PM_{2.5}不能被鼻孔、喉咙所阻挡，能通过呼吸系统被直接吸入人体，沉积到肺泡，甚至可通过肺直接吸收而到达体内其他器官。如果长期吸入含有PM_{2.5}的污染空气，会导致人体呼吸系统和其他器官系统和组织结构的损害。美国大波士顿地区、芬兰赫尔辛基和我国北京的研究表明，PM_{2.5}对心血管疾病的发病、急诊和死亡率也有显著影响，可使心肌缺血而导致心血管疾病，包括心血管系统的动脉粥样硬化、心律失常和缺血性疾病。此外，PM_{2.5}已在2013年被国际癌症研究机构（IARC）确认为是致癌物，致癌级别与吸烟、食用发霉食物、遭受紫外线辐射和呼吸甲醛等归为一类。本研究表明我国大约70%的人口生活在PM_{2.5}年均值高于35 μg/m³的地区，PM_{2.5}导致的健康风险不容忽视。

表 7. 我国暴露于不同PM_{2.5}浓度的人群比例（2012）

	PM _{2.5} 的年均值 (μg/m ³)					
	<10	10-15	15-25	25-35	35-100	>100
暴露人口 (亿)	0.47	0.35	1.54	1.65	7.89	1.57
比例 (%)	3.5%	2.6%	11.5%	12.3%	58.5%	11.6%

美国癌症协会进行的一项队列研究分析表明，PM2.5 每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全死因死亡率、心肺疾病死亡率和癌症死亡率分别升高 4%、6%和 8%；生活在污染严重的城市，患肺癌的风险比清洁城市高 10-15%。美国大波士顿地区、芬兰赫尔辛基和我国北京的研究表明，PM2.5 对心血管疾病的发病、急诊和死亡率也有显著影响，可使心肌缺血而导致心血管疾病，包括心血管系统的动脉粥样硬化、心律失常和缺血性疾病

本研究中考虑了四种由 PM2.5 引起的健康结局：缺血性心脏病、脑卒中、慢性阻塞性肺疾病和肺癌，并估计了 2012 年因煤 PM2.5 排放导致的不同健康结局的超额死亡人数。研究表明，2012 年因煤 PM2.5 排放导致的超额死亡人数约为 67 万，其中因脑卒中、缺血性心脏病、慢性阻塞性肺疾病和肺癌的超额死亡人数分别为 35 万、17 万、8.4 万和 6.5 万。

表 8 因煤排放 PM2.5 造成的超额死亡人数（2012）

健康结局	超额死亡人数（万）	置信区间
脑卒中	35.0	(13, 45)
缺血性心脏病	17.0	(12, 26)
慢性阻塞性肺疾病	8.4	(4, 12)
肺癌	6.5	(2, 9)
合计	67	(31, 92)

4. 煤炭的外部损害成本

在上述量化分析的基础上，本研究采用货币化方法将不同领域的损害进行了货币化和加总。其中在人体健康的损害成本估算中，我们采用了支付意愿 WTP (Willingness to Pay) 的方法，它是为防止一个社会成员死亡所愿付出的价值，或者是一个社会为减少污染造成的早死所愿意支付的费用。它并不是估计一个具体的人的价值，而是社会愿意为降低一定的死亡风险而付出的价值。

表 9 归纳了煤炭生产及消费环节的损害成本，分析表明货币化后的损害成本约为 260 元/吨煤，其中煤炭生产的外部损害成本为 66.3 元/吨煤，约占 25.5%；煤炭运输的外部损害成本为 27.8 元/吨煤，约占 10.7%；煤炭消费的外部损害成本为 166 元/吨煤，约占 63.8%。

表9 煤炭生产及消费产生的环境及健康损害成本（2012）

环节	类别	分项	元/吨
煤炭生产	煤矿资源	资源浪费	11.00
		水资源	水资源耗减
		水资源污染	5.81
	生态系统	农业生态系统	2.00
		水土流失及生态退化	19.30
	人体健康	矿工人员死亡	0.23
		职业病直接损失	0.14
		职业病间接损失	0.21
	合计	66.34	
煤炭运输	公路运输	事故、噪声、环境等	23.6
		铁路运输	事故、噪声、环境等
	水路运输	事故、噪声、环境等	1.48
	合计	27.8	
煤炭消费	人体健康	缺血性心脏病、脑卒中、慢阻肺及肺癌等超额死亡	166.2
总计			260.3

5. 煤炭开采、运输与消费环节产生的温室气体排放

除了以上对水资源、生态系统及大气环境和人体健康的影响以外，煤炭在生产及消费过程中还产生大量的温室气体，如煤炭开采过程中的甲烷排放、煤炭运输过程中的交通排放及煤炭消费过程中的二氧化碳和黑碳排放等。

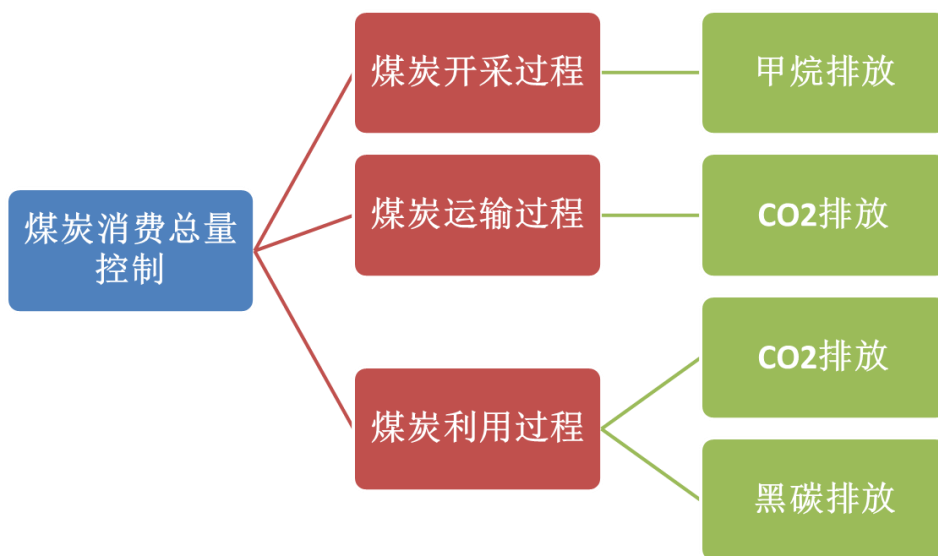


图 10. 煤炭开采、运输及利用过程的温室气体排放

虽然温室气体并不会在短期内产生对环境和人体健康的损害，但在更长的时间尺度上由温室气体排放引起的全球气候变化可能产生不可估量的损失和经济成本。一般而言，温室气体的社会成本需要采用全球综合评价模型进行估计。首先将排放情景转换为全球温升，然后再利用“损害方程”将全球温升转换为温升影响下的经济损失成本，而后再将未来的成本折现到当下。根据美国政府关于碳社会成本的联合工作组的相关计算，在 3%折现率条件下 2010 年每吨 CO₂ 当量的社会成本为 37 美元。温室气体社会成本的估计具有较大的不确定性，这主要是由于对温室气体浓度的气候响应、气候系统中的正向及负向反馈、损失函数的完备性和准确性、未来适应气候变化的能力以及折现率的选取等均有科学不确定性。目前基于主流全球综合评价模型的估计结果在 12 美元（5%折现率）到 64 美元（2.5%折现率）之间。

表 10 综合了煤炭生产、运输和消费各环节的温室气体排放。本研究表明，一吨煤炭生产、运输和消费全周期的温室气体排放为 2.179 吨二氧化碳当量，其中 95%左右发生在消费环节。由于我国目前缺乏对于温室气体社会成本的测算。如果采用目前主流模型对全球碳社会成本的估计（考虑全球范围内因温升导致气候变化引致的损害，而不局限于中国境内），则吨煤生产、运输和消费产生温室气体的社会成本将在 160.8 元/吨煤-857.7 元/吨煤之间。但这一估计结果高度依赖于对温室气体社会成本的估计，因此本研究并未将其计入煤炭生产及消费产生的环境及健康损害成本。虽然温室气体社会成本的估计目前还广受争议且具有较大的不确定性，但温室气体排放导致经济损失和社会成本的结论毋庸置疑。未来我国需要进一步对温室气体的社会成本进行更深入的研究。

表 10 煤炭生产、运输和消费产生的温室气体排放

	煤炭生产	煤炭运输	煤炭消费	总量
温室气体排放 (kg)	CH ₄ 4.64	CO ₂ 16.7	CO ₂ 1890 黑碳 0.95 (低估值)	
折合二氧化碳 当量 (kg CO ₂ e)	92.4	16.7	2070 (低估值)	2179 (低估值)
温室气体外部 成本低限 (元/ 吨煤)	6.8	1.2	152.8	160.8

6. 现行的煤炭生产成本

煤炭完全生产成本是在考虑煤炭资源价值、与煤炭生产有关的生态保护以及煤炭城市、煤炭企业可持续发展等诸多因素的情况下，能够全面完整地反映煤炭企业全部支出的成本。煤炭完全生产成本应包括资源成本、基本生产成本、安全成本、生态环境成本和可持续发展成本等，具体如下图所示。

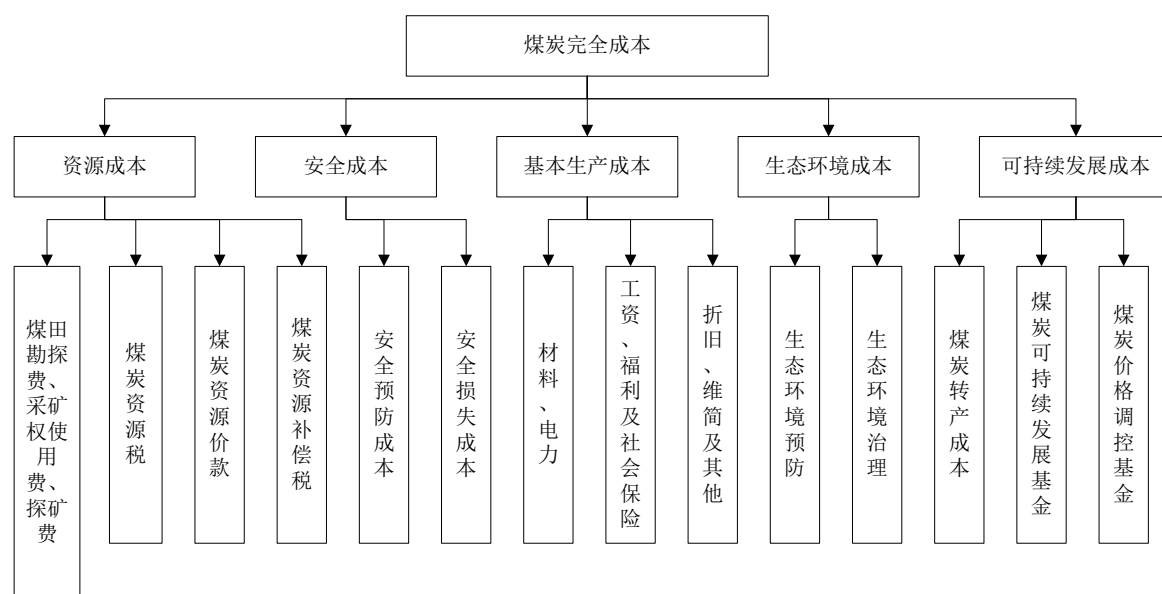


图 10 煤炭完全成本构成

尽管各级政府在煤炭企业成本核算制度、方法、内容等方面都做了相应的完善，如中央政府首先制定了增加煤炭安全生产投入的办法，安徽建立了新井建设资金，山东建立了改革发展基金，陕西建立了煤矿转产资金，河南、安徽等省提高了维简费提取标准。这些政策促进了煤炭成本构成的完善，但仍缺乏全面系统的考虑，仍存在诸多的问题亟待解决。如我国现行煤炭企业成本核算范围窄，缺乏完整性，没有反应资源成本，没有反应煤矿转产成本，环境成本缺项等一系列问题。

表 11 现行煤炭生产成本情况

煤炭生产成本构成			
分类	项目	目前金额（元/吨）	占总成本比重（%）
资源成本	采矿权	2-3	0.5
	资源税	焦煤 8，其他 3-4	0.6
	资源补偿费	2	0.5
开采及加工成本	工人工资	200	44.2
	固定资产折旧	35	7.7
	维简费	60	13.2
	安全费	15	3.3
	土地坍塌费	20	4.4
	水电及材料费	80	17.7
环境成本	可持续发展基金	15	3.3
	企业工人转产费	/	/
	环境恢复费	20	4.4
吨煤平均成本		452	100

资料来源：根据企业调研和整理相关文献得到。主要文献：航春慧，“煤炭企业成本管理策略”，《现代商业》，2011（26）：148~149；赵海龙：“煤炭企业成本构成及其控制问题研究”，华中科技大学博士学位论文中，2010年；刘艳敏：“煤炭价格影响因素分析及机制研究”，中国矿业大学（北京），博士学位论文，2012年。

与煤炭使用产生的外部损害成本相比，目前煤炭生产、运输与消费过程中承担的环境税费远低于损害成本。据测算，煤炭生产、运输与消费过程中的环境税费仅约 30-50 元/吨煤，并且绝大部分集中在煤炭的生产环节。煤炭消费环节的环境税费仅为 5 元/吨的排污费，仅占煤炭消费对人体健康损害成本的 3%。

虽然目前我国的煤炭定价已经市场化，但这部分价格仅反映了供需关系，并未完全反应煤炭生产与消费的外部损害成本。煤炭生产与消费的外部损害成本仍然没有内部化到煤炭的定价体系中去。未来我国需要进一步改革化石燃料和煤炭的定价机制，制定合理的煤炭生产和消费的环境税费，将煤炭生产和消费过程中产生的外部损害成本内部化，利用价格的手段调整煤炭的合理生产与消费，实现能源结构的调整和优化。此外，在长期我国应当开展温室气体社会成本的研究，考虑将温室气体的长期社会成本也逐步纳入能源定价机制中，引导我国能源体系向安全、高效、绿色和低碳转型。

7. 结论

我国的经济长期依赖化石能源，而化石能源的生产、运输和消费导致了一系列对水资源、水质、生态系统、空气质量和人体健康的不利影响。本研究基于 2012 的数据测算了煤炭生产、运输和消费对水、生态系统、空气质量和人体健康的不利影响，并对不利影响进行了货币化的分析，以揭示这部分被“隐藏”的外部成本。计算结果表明我国煤炭的外部成本约为 260 元/吨煤，也即按目前我国煤炭生产、运输和消费的技术及末端治理情况估计，吨煤产生的环境和健康影响为 260 元。于此对应，我国的煤炭定价机制虽然部分考虑了这些社会成本，但环境税费的程度却远远不足以将这些外部成本内部化。我国目前煤炭定价机制中的环境税费仅为 30-50 元/吨煤，且大部分集中在生产端，煤炭消费侧的排污费仅为 5 元/吨煤左右。而本研究的结果表明，在煤炭的外部社会成本中有 64% 发生在煤炭的消费侧，约为 166 元/吨，远高于现行的排污收费水平。

未来我国需要进一步改革化石燃料和煤炭的定价机制，特别要加强煤炭消费环节的排污税费水平。需要注意的是，本研究测算的是环境损害成本，而在外部损害内部化的过程中还需要考虑避免这部分损害的治理成本。由于治理成本往往低于损害成本，因此内部化的价格水平应当介于两者之间。通过制定合理的煤炭生产和消费的环境税费，将煤炭生产和消费过程中产生的外部损害成本内部化，利用价格的手段调整煤炭的合理生产与消费，实现能源结构的调整和优化。

本报告由清华大学、环保部环境规划院、国家气候战略中心、中国水利水电科学院、北京大学医学部、社科院、煤炭科学研究总院共同完成。