

“京津冀”地区煤炭相关产业链的体现能核算与政策分析

刘耕源^{1,2*}, 鲁颐琼^{3,4*}, 陈操操⁵

(1. 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875;
2. 北京市流域环境生态修复与综合调控工程技术研究中心, 北京 100875; 3. 中国人民大学环境学院, 北京 100872;
4. 国家能源集团, 北京 100011; 5. 北京市应对气候变化研究中心, 北京 100031)

【摘要】 目前, 我国面临的大气污染问题愈发严重, 尤其在“京津冀”地区更为突出。而煤炭相关产业链的能源消耗结构及其污染物排放是导致此问题的重要原因之一。本研究基于2012年“京津冀”地区各省、市的能源平衡表, 通过区域间能源调配模型, 绘制了煤流和能流桑基图, 厘清了“京津冀”地区2012年煤炭相关产业链的物质与能量走向, 并运用了投入产出法系统核算了“京津冀”地区煤炭相关产业链的体现能与24种污染物排放量。研究结果表明: ①“京津冀”地区的原煤主要依赖调运, 属于净煤炭进口地区。②原煤的直接使用在“京津冀”地区的煤炭相关产业链中占有非常大比重。将体现能角度分析的结果与能量角度分析的结果对比, 可以发现煤化工产业在煤炭相关产业链中的潜在能量消耗仍然具有较大的贡献。③焦炭是终端消费能量的主要来源, 也是体现能的主要贡献源。④在煤炭转化能源利用效率上, “京津冀”地区2012年煤炭相关产业链洗选煤、煤制品加工、炼焦三个环节的效率分别为87.77%、92.46%、90.97%, 稍低于中国2012年96.16%的利用效率。⑤原煤、焦炭的直接消费和炼焦过程对“京津冀”地区2012年煤炭相关产业链七种主要污染物的贡献率最大。为了有效减少“京津冀”地区煤炭相关产业链的污染物排放, 需要对原煤、焦炭的直接消费和炼焦过程采取相应的减排政策和措施。本研究可以为“京津冀”地区煤炭相关产业链提高能源利用效率、减少体现能和污染物排放、采取改进措施提供一定的理论支持和政策建议。

【关键词】 京津冀; 体现能; 投入产出方法; 煤工业链; 区域排放清单

【中图分类号】 F407.21; X51

【文章编号】 1674-6252 (2018) 03-0014-13

【文献标识码】 A

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2018.03.014

“京津冀”地区由北京市、天津市、河北省构成, 最早由首都经济圈发展而来, 包括中国的政治、经济、文化中心, 在国内具有十分重要的战略地位。然而目前, “京津冀”地区面临的大气污染问题较为严重。以 $PM_{2.5}$ 为例, 根据资料, 2015年北京市空气中 $PM_{2.5}$ 的年平均浓度值为 $80.57\mu g/m^3$ ^[1], 是国家标准限值的2.30倍^[2]; 河北省 $PM_{2.5}$ 的年平均浓度值为 $77\mu g/m^3$, 是国家标准限值的2.19倍^[3]; 天津市 $PM_{2.5}$ 的年平均浓度值为 $70\mu g/m^3$, 是国家标准限值的2.02倍^[4]。相关研究表明, “京津冀”地区的 $PM_{2.5}$ 污染已经对人群健康造成了威胁^[5,6]。此外, “京津冀”地区大气污染造成的雾霾也对中国的国际形象造成了一定影响。

我国政府对“京津冀”地区的大气污染问题, 尤其

是 $PM_{2.5}$ 污染问题非常重视。2016年全国“两会”的国务院《政府工作报告》中, 提出了要推进“京津冀”协同发展, 在生态环保等领域取得突破性进展^[7]。2015年12月国家发改委、环保部联合发布的《京津冀协同发展生态环境保护规划》中要求, 到2020年“京津冀”地区 $PM_{2.5}$ 年均浓度控制在 $64\mu g/m^3$ 左右, 并提出将“京津冀”地区打造成生态修复、环境改善示范区的目标^[8]。国务院还发布实施了《国家环境保护“十二五”规划》和《大气污染防治行动计划》等文件, 加大空气污染治理的综合治理力度, 并在最新的国家《国民经济和社会发展的第十三个五年规划纲要》中针对“京津冀”地区提出构建区域生态环境监测网络、预警体系和协调联动机制, 削减区域污染物排放总量的计划^[9,10]。通过加强大气污

责任作者: 刘耕源, 鲁颐琼。

刘耕源 (1983—), 男, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要从事城市生态规划与管理, E-mail: liugengyuan@bnu.edu.cn。

鲁颐琼 (1983—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事环境管理、碳减排管理, E-mail: luyiqiong@shenhua.cc。

染联防联控, 实施大气污染防治重点地区气化工程, 到“十三五”末, 实现“京津冀”地区 $PM_{2.5}$ 浓度下降 25% 的目标^[11]。北京、天津、河北的政府部门也相继提出了各自的大气污染防治计划和措施 (见表 1), 改善大气环境污染问题^[12]。

北京市环保局 2014 年发布的《北京市 2012—2013 年度 $PM_{2.5}$ 来源综合解析结果》显示, 北京市由燃煤产生的 $PM_{2.5}$ 排放量占其本地总排放量的 22.4%, 在所有来源中位居第二位^[13]; 天津市由燃煤产生的 $PM_{2.5}$ 排放量占其本地总排放量的 27%, 在所有来源中位居第二位^[14]; 在河北省石家庄市, 由燃煤产生的 $PM_{2.5}$ 排放量占其本地总排放量的 28.5%, 在所有来源中位居第一位; 在河北省廊坊市, 由燃煤产生的 $PM_{2.5}$ 排放量占其本地总排放量的 50%, 在所有来源中位居第一位; 在河北省其他

城市, 煤炭产业也在本地 $PM_{2.5}$ 排放中占有较大比重^[15]。可见, 燃煤对“京津冀”地区的 $PM_{2.5}$ 起到了较大的贡献作用。煤炭及其相关产业链的直接和间接排放是“京津冀”地区 $PM_{2.5}$ 的主要来源之一, 也是目前急需解决的大气污染问题^[16]。

“京津冀”地区以煤炭作为支柱能源, 其大气污染问题与能源结构密切相关, 在能源结构维持不变的情况下, 这种污染问题很难根本性改变。这在我国北方具有一定的典型性和代表性。推进“京津冀”地区的煤炭相关产业链的升级与转型不仅能改善本地区的生态环境, 更对我国北方以煤炭为主要能源的区域具有一定的引导性和示范性作用, 便于提出更有针对性的减排与替代对策, 为政府决策提供一定的理论支持和政策建议。

就国际视角而言, 经历过伦敦烟雾事件和洛杉矶光

表 1 北京、天津、河北大气污染防治措施整理及对比

区域	出台的法规、 条例和文件	技术指标	具体措施
北京市	《北京市 2012—2020 年大气污染防治措施》(2012 年), 《北京市五年清洁空气行动计划》(2013 年), 《北京市大气污染防治条例》(2014 年), 《北京市空气重污染应急预案》(2015 年)	到 2020 年, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、总悬浮颗粒物、 SO_2 、 NO_2 等主要污染物的年均浓度均比 2010 年下降 30%。其中 SO_2 达到 $20\mu g/m^3$ 以下, 总悬浮颗粒物稳定达标, NO_2 基本达标 (达到 $40\mu g/m^3$), PM_{10} 达到 $80\mu g/m^3$ 左右, $PM_{2.5}$ 达到 $50\mu g/m^3$ 左右。臭氧超标小时数比 2010 年减少 30%, 全年控制在 200 小时左右	1. 城市核心区无煤化工程: 利用拆迁、危房改造、煤改电、老楼通热通电等形式, 实现核心区无煤化; 城市拓展区基本无燃煤锅炉工程: 在持续进行燃煤锅炉清洁能源改造的基础上完成六区煤锅炉改造工程 2. 对农村实行“减煤换煤”工程, 启动天然气入户试点工程 3. 调整退出污染企, 2015 年底前水泥产能压缩到 550 万 t, 2016 年前完成 1 000 家企业淘汰任务; 滚动式启动推进百项技改项目 4. 制定并出台锅炉、炼油与石油化工、印刷、木制家具制造、汽车制造、汽车修理、工业涂装等更为严格的行业大气污染物排放标准 5. 新增燃油出租车实施 8 改 6、电动车不限行、新增柴油车实施国五标准 6. 在税费方面, 开征扬尘排污费, 制定挥发性有机物排污费, 调整优化停车收费, 制定交通拥堵费, 减免新能源汽车停车费、过路费
天津市	《天津市 2012—2020 年大气污染防治措施》(2012 年), 《天津市重污染天气应急预案》(2014), 《天津市大气污染防治条例》(2015 年)	第一阶段: 到 2015 年, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 年均浓度分别下降 $4\mu g/m^3$ 、 $12\mu g/m^3$, 达到 $51\mu g/m^3$ 、 $84\mu g/m^3$ 。第二阶段: 到 2020 年, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 年均浓度分别再下降 $4\mu g/m^3$ 、 $12\mu g/m^3$, 达到 $47\mu g/m^3$ 、 $72\mu g/m^3$ 。第三阶段: $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 年均浓度力争早日达到新标准限值, 进入环境空气质量达标城市行列	1. 严格控制“两高一资”项目, 2020 年前煤炭消费总量控制在 6 300 万 t 2. 将中心城区、滨海新区和环城四区建成区建成基本无燃煤区, 推进远郊区县燃煤供热锅炉房热电联产替代或改燃 3. 快速路环线以内区域土石方施工现场实行全封闭作业, 加强道路机扫水洗作业, 控制交通扬尘二次污染 4. 加强工业企业烟气脱硫、脱硝和烟粉尘治理, 2020 年前所有保留机组完成脱硝治理任务, 烟尘排放浓度未实现稳定达标的燃煤机组必须进行袋式除尘器改造 5. 2020 年前, 实施国家第 V 阶段机动车排放标准和国 V 油品标准, 淘汰全部 29 万辆黄标机动车 6. 争取到 2020 年, 在一次能源消费结构中, 煤炭消费比重控制在 40% 以下
河北省	《河北省大气污染防治行动计划实施方案》(2013 年), 《河北省大气污染深入治理三年行动方案》(2015 年), 《河北省大气污染防治条例》(2016 年)	2017 年, 全省 $PM_{2.5}$ 浓度比 2012 年下降 25% 以上。石家庄、唐山、保定、廊坊市和定州、辛集市 $PM_{2.5}$ 浓度比 2012 年下降 33%, 邢台、邯郸下降 30%, 秦皇岛、沧州、衡水下降 25% 以上, 承德、张家口下降 20% 以上	1. 提前一年完成国家“十二五”落后产能淘汰任务, 到 2017 年, 全部淘汰 10 万 kW 以下常规燃煤机组, 煤炭消费量比 2012 年净削减 4 000 万 t 2. 加强对工业源的治理。到 2015 年, 新建和改造燃煤机组、钢铁烧结机完成脱硫治理、拆除旁路; 燃煤电厂、水泥完成脱硝治理; 燃煤电厂、水泥、钢铁等行业完成除尘升级改造治理; 石化行业完成有机废气综合治理 3. 加强对黄标车污染的整治。到 2014 年, 各设区市和省直管县 (市) 城市建成区全面实施“黄标车”限行。到 2015 年, 全部淘汰 2005 年底前注册营运的黄标车。到 2017 年, 全部淘汰黄标车 4. 加强对汽车油品的管理。2015 年底前, 全省供应符合国家第五阶段标准的车用汽、柴油 5. 到 2017 年, 全省完成 80% 具备改造价值的老旧住宅供热计量及节能改造

化学烟雾事件以后,各国都对燃煤和汽车尾气的处理制订了相应标准,起到了一定的效果。而“京津冀”地区的大气污染问题却不是一次污染问题,也不仅仅是光化学污染,而是一种复合型污染,污染物成分复杂,来源也较广。对于依赖高能源消耗的部分发展中国家而言,“京津冀”地区的大气污染问题具有一定的代表性。如何通过能源结构的优化调整,减少大气污染物排放,具有一定的研究价值。

从科学意义上,引入产业链和体现能的研究方法为解决“京津冀”地区的大气污染问题提供了一种新的视角,能够从产业链的角度整体上对“京津冀”地区的煤炭利用情况进行整体和系统的评估与核算,通过优化煤炭链系统,实现污染物排放量控制与能源供给的最优平衡,具有一定的科学创新性。

1 国内外研究进展

1.1 煤炭相关产业链的能源消耗和污染物排放研究进展

产业链的概念源于西方,由德国经济学家赫希曼在1958年提出,经过价值链、供应链等微观层面概念的补充而进一步发展。在中国,产业链的概念不断得到丰富和扩充^[17]。龚勤林指出,产业链是一种在经济活动中相关的产业部门基于经济活动的内在技术、经济关联而客观形成的环环相扣、首尾相接的链条式关联关系形态^[18]。郁义鸿认为,产业链是一种由最终产品的生产加工全过程的各个环节——包括了从最初的原材料到终端产品再到消费者手中所构成的整个生产链条^[19]。以上学者对产业链的阐述,重点突出了产业链中部门间基于技术上的关联性和链式联系^[20]。

部分学者还对区域产业链的概念进行了阐述。陈朝隆等指出,区域产业链是特定区域范围内的产业链段或链条,即产业链在特定区域的形态;他还从系统科学的视角将区域产业链的概念进一步加以说明,认为区域产业链本质上是一种区域经济组织,其运行与发展符合产业组织运行和区域发展的基本规律^[21]。龚勤林研究了区域产业链形成与发展的相关问题^[18],认为区域产业链要连通不同城市产业链之间的断链,让产业链在空间上得到延伸,使得产业链各个环节在区域内的不同城市间得以分布^[20]。

一些学者借助产业链和区域产业链的概念,对煤炭资源利用系统的能源消耗和污染物排放进行了研究。煤炭资源利用系统包括原煤开采、洗选、运输、煤化工、供暖供热及终端消费,从产业链的角度分析煤炭资源的利用情况,可以更直接和更清楚地厘清煤炭资源利用系统的资源分配、技术状况、能耗水平和排放情况。Shrestha 和 Marpaung 的研究表明,运用经济手段对火力发电系统进行规划,可以在一定程度上提升火力发电系统的运行效率,促使能源构成多种多样

化^[22]。刘强等研究了经济手段对电力企业碳排放的限制作用,并建立了相关模型用于综合规划评价^[23]。Aden 等通过研究中国煤炭资源的开发利用状况,对煤炭资源的需求驱动力、供应约束条件、可替代选项、环境外部性等因素进行了分析,并提出了有针对性的改进建议^[24]。濮洪九从煤炭产业链的角度对中国煤炭资源的利用现状进行了分析与预测,并提出了煤炭资源可持续发展的概念,论述了煤炭资源在开发利用中应有的约束条件与政策建议^[25,26]。赵剑峰从低碳经济的视角研究了煤炭工业的清洁利用情况,提出我国应适度发展煤制烯技术,对煤制油技术进行一定程度的限制,并及时修订完善煤炭相关法律法规^[27]。Fankhauser 等利用碳排放税从空间、时间的角度对煤炭市场产业结构进行了优化和调控,从而实现降低成本与增大市场灵活度的目的^[28,29]。袁迎菊分析了目前煤炭产业链结构,以IPCC 标准为基础,对煤炭产业链碳排放的度量方法进行了阐述;并通过对煤炭产业链低碳演化进程的综合分析,揭示了影响煤炭产业链低碳技术和影响演化过程的内部因素与外部因素,提出了煤炭相关产业链的演化过程^[30]。

目前,有关产业链、区域产业链的概念已较为明确和统一,但尚缺乏机制方面的深入研究。而对煤炭资源利用系统污染物排放控制的研究往往局限于单一污染物,缺乏对系统的精细分析与描述,缺乏宏观角度的系统性和整体性的核算与优化。从煤炭相关产业链的整体角度去核算能源消耗和污染物排放,将有助于更好地配置和利用煤炭资源,实现资源利用与环境保护的平衡。

1.2 体现能的核算

人类的生产活动产生的所有的产品和提供的所有服务都必须直接或间接消耗各种能源^[31]。而体现能即表示产品生产全过程中消耗的直接和间接能源的总和,也称为“虚拟能”^[32]“隐含能”^[33]“隐性能源”^[34]。其概念最早源于1974年的国际高级研究机构联合会能源分析工作会议,并不断得到丰富和发展^[35]。马涛提出将体现能定义为生产某种产品实际消耗的能源,由技术水平、生产条件、能源效率等因素决定^[36,37]。罗思平等定义体现能是指产品生产、加工、运输等全过程消耗的能源总和^[38]。庞军等认为出口体现能是生产国为了生产出口产品而在本地直接消耗和间接消耗的总能源^[39]。

目前,体现能的核算方法已经较为成熟,主要有过程分析法和投入产出分析法两种核算方法。过程分析法即通过生命周期评价去鉴别和量化生产过程中消耗的能源,常用于核算工业材料和建筑电热的体现能^[40]。而投入产出分析法则基于投入产出表提供的完整框架,系统地将非直接消耗能源也考虑在内^[41],通过经济学和数学模型核算出体现能^[36]。对于较为复杂的系统,采取

过程分析法往往需要大量数据, 而且运算过程复杂, 人工工作量巨大; 而投入产出分析法则可以通过模型在投入产出表的基础上较为方便和快捷地对体现能进行核算^[42]。

国外学者从体现能的视角开展了比较丰富的研究。Kaharl 和 Roland 根据中国的投入产出与能源消耗数据, 验证了中国贸易出口量与能源消费量间的相关关系, 认为中国能源消费增长的首要驱动因素是出口贸易, 中国需制定既能兼顾能源环境要素又能兼顾经济贸易发展的长期发展^[43]。Rahimifard 等应用产品体现能模型核算了产品生产过程中的直接能源消耗和间接能源消耗, 并指出直接能源消耗可以分为理论能源消耗与辅助能源消耗。通过对体现能的核算, 能提高非有效能源的透明度, 促进能源利用率的提升^[44]。Kara 等将过程分析法与投入产出分析法相结合, 对 6 种产品和 4 种供应链进行了体现能核算, 分析了制造全球化的发展趋势对产品体现能的响应。结果表明, 生产地的选择, 产品运输的方式、距离、重量等都是决定产品体现能的重要条件。通过选择更适合的本地生产商, 采取更加高效和环保的运输途径, 可以进一步减少产品的体现能^[35,45]。

国内学者对体现能的研究主要集中于进出口贸易方向。Li 等根据中国 1997 年的投入产出表, 推算出 20 种主要进出口产品的能源消耗系数, 并由此核算出 1996—2004 年中国进出口贸易的体现能^[46]。刘峰则将出口能源消耗系数和进口能源消耗系数区别计算, 根据 2000 年日本的投入产出表推算出进口产品的能源消耗系数和 2002 年中国的投入产出表推算出口货物的能源消耗系数, 并核算了 2001—2005 年中国进出口产品的体现能, 结果表明, 研究时段内中国产品出口体现能占到全年能源消费总量的 24%~33%^[47]。齐晔等根据投入产出分析法核算了中国 1997—2006 年产品进出口贸易的体现能, 结果表明, 中国进口消费的相当一部分能源又以产品体现能的形式出口到其他国家地区, 客观地反映了中国产品进出口贸易中的体现能流动^[35]。Chen 等根据投入产出分析法核算了 2001—2006 年中国产品进出口贸易中的体现能, 结果表明, 2002 年中国产品体现能净进口折合 1.7 亿 t 标准煤, 产品体现能净出口折合 4.1 亿 t 标准煤^[48]。此外, 部分学者还将对体现能的研究扩展到其他领域。Liu 等根据投入产出法核算了 1992—2007 年中国基础设施建设的体现能。研究通过结构分解模型, 阐述了影响其体现能的主要因素, 并发现了 2007 年中国基础设施的体现能占当年能源消费总量的比例过高。从能源利用率的角度考虑, 当年中国部分基础设施建设的合理性较低^[35,49]。张力小等根据投入产出法对北京市 1987—2007 年城市经济活动中的体现能进行了核算, 从产业整合、结构调整的角度为北京市的节能减排工作提供了新思路^[42]。

目前, 将体现能与染物排放的核算应用到区域煤炭

相关产业链中的研究较少。而区域煤炭产业链研究多从供应链和能源安全的角度来分析, 污染物排放多从单个能源消耗的角度考虑, 缺乏深度跟踪区域煤炭相关产业链的单独走向, 未梳理出能源利用主线和分支, 无法得到对煤炭相关产业链的能源消耗和污染物排放的纵览情况。通过引入体现能的方法, 利用能源平衡表、相关数据和模型可以对煤炭相关产业链各个环节的能源消耗和污染物排放进行详细核算, 较为客观和真实地反映“京津冀”地区煤炭消费最终产生的环境影响。

2 研究方法

本研究尝试以“京津冀”地区的能源平衡表为基础, 以“京津冀”地区煤炭相关产业链为研究对象, 查找“京津冀”地区煤炭相关产业链能源消耗相关数据, 厘清“京津冀”地区 2012 年煤炭相关产业链的物质走向, 并对煤炭相关产业链的体现能进行详细计算。在此基础上, 核算并编制 2012 年“京津冀”地区煤炭相关产业链的污染物排放清单。最后, 依据煤炭相关产业链体现能和污染物排放清单的结果提出有针对性的优化改进方案和政策建议。

2.1 数据来源

本研究能源消耗数据来源于各省市的能源平衡表。“京津冀”地区 2012 年能源平衡(实物量)总表的数据来源于《中国能源统计年鉴 2013》中北京市 2012 年能源平衡统计(实物量)、天津市 2012 年能源平衡统计(实物量)和河北省 2012 年能源平衡统计(实物量)^[50]。能源折算系数(见表 2)来源于《GB/T 2589—2008》^[51]和《能源统计知识手册》^[52]。

表 2 能源折算系数

能源名称	平均低位发热量	折标准煤系数	转换系数(J/万 t 或 J/亿 m ³)
原煤	20 908 kJ/kg	0.714 3 kgce/kg	2.09×10^{14}
洗精煤	26 344 kJ/kg	0.900 0 kgce/kg	2.63×10^{14}
其他洗煤	8 363 kJ/kg	0.285 7 kgce/kg	8.36×10^{13}
型煤		0.500 0~0.700 0 kgce/kg	1.76×10^{14}
煤矸石		0.178 6 kgce/kg	5.23×10^{13}
焦炭	28 435 kJ/kg	0.971 4 kgce/kg	2.84×10^{14}
焦炉煤气	16 726~17 981 kJ/m ³	0.571 4~0.614 3 kgce/m ³	1.74×10^{15}
高炉煤气	3 763 kJ/m ³	0.128 6 kgce/m ³	3.76×10^{14}
转炉煤气	4 976~17 160 kJ/m ³	0.17~0.59 kgce/kg	1.11×10^{15}
其他煤气	10 454 kJ/kg	0.3 571 kgce/m ³	1.05×10^{15}

资料来源:《GB/T 2589—2008》《GB21256—2007》和《能源统计知识手册》。

2.2 数据处理

2.2.1 “京津冀”地区特定种类能源净调运量的计算

根据 2012 年北京、天津、河北的能源平衡表，对于一种特定的能源，只能得到三个省（市）各自的调入量和调出量，在缺少三个省（市）间调入量和调出量的情况下，无法得到“京津冀”地区整体的调入量和调出量。但是，可以运用以下模型计算出该种能源在“京津冀”地区整体的净调运量（净调运量 = 调入量 - 调出量）。

对于一个含有 n 个子区域的地区 Ω ，某种能源的调入调出具有如下模型。

$$C_i = \alpha_i + c_{12} + c_{13} + \dots c_{ij} \quad (1)$$

式（1）中， C_i 为 i 区域的调出量； α_i 为 i 区域调出 Ω 地区外的量； c_{ij} 为 i 区域调出到 Ω 地区内 j 区域的量。

$$R_i = \beta_i + r_{21} + r_{31} + \dots r_{ij} \quad (2)$$

式（2）中， R_i 为 i 区域的调入量； β_i 为从 Ω 地区外调入 i 区域的量； r_{ij} 为 i 区域接收到 Ω 地区内 j 区域调运的量。

$$c_{ij} = r_{ij} \quad (3)$$

式（3）为在 Ω 地区内，从 i 区域调出到 j 区域的量等于 j 区域接收到从 i 区域调运的量。

由式（1）、式（2）、式（3）可以推导出下式：

$$\begin{aligned} \Omega_{\alpha-\beta} &= \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i - \sum_{i=1}^{i=n} \beta_i \\ &= \sum_{i=1}^{i=n} C_i - \sum_{i=1}^{i=n} R_i + \left(\sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=n} c_{ij} - \sum_{i=1}^{i=n} c_{ii} \right) - \left(\sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=n} r_{ij} - \sum_{i=1}^{i=n} r_{ii} \right) \\ &= \sum_{i=1}^{i=n} C_i - \sum_{i=1}^{i=n} R_i + \left[\sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=n} (c_{ij} - r_{ij}) \right] \quad \begin{matrix} i=n & i=n \\ = & = \end{matrix} \quad (4) \\ &= \sum_{i=1}^{i=n} C_i - \sum_{i=1}^{i=n} R_i \end{aligned}$$

式（4）中， $\Omega_{\alpha-\beta}$ 为 Ω 地区整体的净调运量。

根据以上模型，代入北京、天津、河北某种能源各自的调入量和调出量，即可算出该种能源在“京津冀”地区整体的净调运量。

2.2.2 “京津冀”地区 2012 年能源平衡（实物量）总表的编制

将北京市 2012 年能源平衡统计（实物量）、天津市 2012 年能源平衡统计（实物量）和河北省 2012 年能源平衡统计（实物量）中的数据加和，并将结果按照横坐标为能源种类，纵坐标包括可供本地区消费的能源量、加工转换投入产出量、损失量、终端消费量等子项目的结构列表，即可得到“京津冀”地区 2012 年能源平衡（实物量）总表（见表 3）。

表 3 “京津冀”地区 2012 年能源平衡(实物量)总表

项目	原煤 / 万 t	洗精煤 / 万 t	其他洗煤 / 万 t	型煤 / 万 t	煤矸石 / 万 t	焦炭 / 万 t	焦炉煤气 / 亿 m ³	高炉煤气 / 亿 m ³	转炉煤气 / 亿 m ³	其他煤气 / 亿 m ³
一、可供本地区消费的能源量	37369	2809.3	-1252.81	1.29	-762.7	2740.7	4.57	4.91	-0.01	0
1. 一次能源生产量	12265									
2. 净调运量（+ 为调入，- 为调出）	24656	1275.8	-1253.87	6.42	-762.8	2762.1	4.57	4.91	-0.01	
3. 进口量	513.99	1673.7		0.39		8.67				
4. 境内轮船和飞机在境外的加油量										
5. 出口量（-）	-191.4	-257.4		-0.94		-10.12				
6. 境外轮船和飞机在境内的加油量（-）										
7. 库存保留（-）、供给（+）量	126	117.19	1.06	-4.58	0.07	-19.95				
二、加工转换投入（-）产出（+）量	-27406	-1907	1931.74	247.15	853.83	6540.9	107.97	526.86	50.53	10.64
1. 火力发电	-12973		-89.04	-1.48	-170.4		-18.56	-334.02	-20.44	
2. 供热	-3022		-50.31	-20.18	-56.68		-12.97	-210.71	-18.77	
3. 洗选煤	-11119	6871.9	2073.68		1081					
4. 炼焦	-62.35	-8764				6576.6	139.5			
5. 炼油及煤制油	-2.89									
6. 制气	-1.6					-35.65				10.64
7. 天然气液化										
8. 煤制品加工	-225.5	-14.27	-2.59	268.81						
9. 回收能								1071.59	89.74	
三、损失量（-）	-18.83									
四、终端消费量（-）	-9945	-902.7	-678.93	-248.4	-91.14	-9282	-112.54	-531.77	-50.52	-10.64
1. 农、林、牧、渔、水利业	-214.5	-0.23								
2. 工业	-7538	-902.5	-182.51	-166.9	-91.14	-9280	-96.81	-531.77	-50.52	-10.64
3. 建筑业	-63.76			-1.31		-0.05	-0.05			
4. 交通运输、仓储和邮政业	-89.07			-0.93			-0.01			
5. 批发、零售业和住宿、餐饮业	-211.7			-3.49		-0.3	-0.63			
6. 生活消费	-1169		-496.42	-69.38			-13.32			
7. 其他	-659.1			-6.42		-0.85	-1.72			
验算（总消耗 - 各部分消耗）	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

数据来源：《中国能源统计年鉴 2013》。

2.2.3 “京津冀”地区 2012 年煤炭链火力发电量走向的推算

由表 2、表 3 可以得出,“京津冀”地区 2012 年煤链中火力发电投入能量合计 2.91×10^{18} J。根据文献 [53] 分析可知,2012 年中国火力发电煤耗率不低于 250g/(kW·h),即能源转换效率不高于 49%。故“京津冀”地区煤链中火力发电产生的电能不高于 $3\,960 \times 10^9$ kW·h,小于 2012 年“京津冀”地区的总用电量 $4\,674.49 \times 10^9$ kW·h^[54]。对于以火力发电为主且电力资源紧张的“京津冀”地区^[55],煤炭链火力发电产生的电能主要用于本地消费。

2.2.4 “京津冀”地区 2012 年能源平衡(能量)总表的编制

完成“京津冀”地区 2012 年能源平衡(能量)总表的编制需要将能源以实物为单位转换为以能量为单位。根据综合能耗计算通则《GB/T 2589—2008》^[51],使用以下公式:

$$E_i = e_i \times p_i \quad (5)$$

式(5)中, E_i 表示能源*i*的能量; e_i 表示能源*i*的实物量; p_i 表示能源*i*的值折算系数。

将表 2、表 3 中的能源实物量代入式(5)中并取绝对值,即可得到“京津冀”地区 2012 年能源平衡(能量)总表(见表 4)。

表 4 “京津冀”地区 2012 年能源平衡(能量)总表

单位: J

项目	原煤	洗精煤	其他洗煤	型煤	煤矸石	焦炭	焦炉煤气	高炉煤气	转炉煤气	其他煤气
一、可供本地区消费的能源量	7.81×10^{18}	7.4×10^{17}	1.05×10^{17}	2.27×10^{14}	3.99×10^{16}	7.79×10^{17}	7.93×10^{15}	1.85×10^{15}	1.11×10^{13}	0
1. 一次能源生产量	2.56×10^{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2. 净调运量	5.16×10^{18}	3.36×10^{17}	1.05×10^{17}	1.13×10^{15}	3.99×10^{16}	7.85×10^{17}	7.93×10^{15}	1.85×10^{15}	1.11×10^{13}	0
3. 进口量	1.07×10^{17}	4.41×10^{17}	0	3.86×10^{13}	0	2.47×10^{15}	0	0	0	0
4. 境内轮船和飞机在境外的加油量	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5. 出口量	4×10^{16}	6.78×10^{16}	0	1.65×10^{14}	0	2.88×10^{15}	0	0	0	0
6. 境外轮船和飞机在境内的加油量	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7. 库存保留或供给量	2.63×10^{16}	3.09×10^{16}	8.86×10^{13}	8.05×10^{14}	3.66×10^{12}	5.57×10^{15}	0	0	0	0
二、加工转换投入产出量	5.73×10^{18}	5.02×10^{17}	1.62×10^{17}	4.35×10^{16}	4.47×10^{16}	1.88×10^{18}	1.87×10^{17}	1.98×10^{17}	5.59×10^{16}	1.11×10^{16}
1. 火力发电	2.71×10^{18}	0	7.45×10^{15}	2.6×10^{14}	8.92×10^{15}	0	3.22×10^{16}	1.26×10^{17}	2.26×10^{16}	0
2. 供热	6.32×10^{17}	0	4.21×10^{15}	3.55×10^{15}	2.97×10^{15}	0	2.25×10^{16}	7.93×10^{16}	2.08×10^{16}	0
3. 洗选煤	2.32×10^{18}	1.81×10^{18}	1.73×10^{17}	0	5.66×10^{16}	0	0	0	0	0
4. 炼焦	1.3×10^{16}	2.31×10^{18}	0	0	0	1.87×10^{18}	2.42×10^{17}	0	0	0
5. 炼油及煤制油	6.04×10^{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6. 制气	3.35×10^{14}	0	0	0	0	1.01×10^{16}	0	0	0	1.11×10^{16}
7. 天然气液化	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8. 煤制品加工	4.71×10^{16}	3.76×10^{15}	2.17×10^{14}	4.73×10^{16}	0	0	0	0	0	0
9. 回收能	0	0	0	0	0	0	0	4.03×10^{17}	9.93×10^{16}	0
三、损失量	3.94×10^{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
四、终端消费量	2.08×10^{18}	2.38×10^{17}	5.68×10^{16}	4.37×10^{16}	4.77×10^{15}	2.64×10^{18}	1.95×10^{17}	2×10^{17}	5.59×10^{16}	1.11×10^{16}
1. 农、林、牧、渔、水利业	4.48×10^{16}	6.06×10^{13}	0	0	0	0	0	0	0	0
2. 工业	1.58×10^{18}	2.38×10^{17}	1.53×10^{16}	2.94×10^{16}	4.77×10^{15}	2.64×10^{18}	1.68×10^{17}	2×10^{17}	5.59×10^{16}	1.11×10^{16}
3. 建筑业	1.33×10^{16}	0	0	2.3×10^{14}	0	1.42×10^{13}	8.68×10^{13}	0	0	0
4. 交通运输、仓储和邮政业	1.86×10^{16}	0	0	1.64×10^{14}	0	0	1.74×10^{13}	0	0	0
5. 批发、零售业和住宿、餐饮业	4.43×10^{16}	0	0	6.14×10^{14}	0	8.53×10^{13}	1.09×10^{15}	0	0	0
6. 生活消费	2.44×10^{17}	0	4.15×10^{16}	1.22×10^{16}	0	0	2.31×10^{16}	0	0	0
7. 其他	1.38×10^{17}	0	0	1.13×10^{15}	0	2.42×10^{14}	2.98×10^{15}	0	0	0
验算(总消耗-各部分消耗)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2.2.5 “京津冀”地区 2012 年煤流和能流图、桑基图的编制

煤流和能流图是根据热力学第一定律,将煤炭链中生产、制造、加工、消费、回收等全过程通过箭头有序连接,标记出物质的流通转化量和能源的流动量,并以图的形式呈现出来,形象、直观地展现某一区域的煤炭源利用状况^[56]。参照 2014 年美国能流图^[57]和 2012 年中国煤流图和能流图^[56, 58],在表 3 和表 4 的基础上利用 Visio 2013 软件可以绘制出“京津冀”地区 2012 年的体现能流图(见图 1)和煤流图(见图 2)。通过 S!nakey 软件,即可以得到“京津冀”地区 2012 年煤炭相关产业链桑基体现能分流图,更加直观地展现体现能的流动。

2.2.6 “京津冀”地区 2012 年煤炭相关产业污染物排放核算

根据欧洲环境署编制的指导手册^[59],可以由表 2 与能源消费、转化污染物排放系数,运用投入产出法得到“京津冀”地区 2012 年煤炭相关产业链污染物排放清单。

2.2.7 能源转化效率的计算

在煤炭相关产业链的能源转化过程中,可以根据以下公式求得能源转化效率:

$$\eta = \sum (A_1 + \dots + A_n) / \sum (B_1 + \dots + B_n) \quad (6)$$

式(6)中, η 为转化效率, $\sum (A_1 + \dots + A_n)$ 为所有产品能量之和; $\sum (B_1 + \dots + B_n)$ 为所有原料能量之和。

3 结果与讨论

3.1 结果分析

本研究以“京津冀”地区 2012 年的能源平衡表为基础,厘清了“京津冀”地区 2012 年煤炭相关产业链物质与能量走向,运用投入产出法核算了“京津冀”地区煤炭相关产业链的体现能,得到如下结果:

(1)“京津冀”地区煤炭利用的主要特点。“京津冀”地区的原煤主要依赖调运,按体现能计算,外省净调入量占全部可消费原煤的 65.98%,综合煤炭相关产业链分析,“京津冀”地区属于净煤炭进口地区。

(2)煤炭转化环节的能量流动特点。从能量的角度分析,原煤为供热提供了绝大部分能量,占其总能量的 82.58%;其次为高炉煤气、焦炉煤气和转炉煤气,占比分别为 10.36%、2.94% 和 2.72%,其余能源占比较小,均不超过 1%。原煤为火力发电提供了绝大部分能量,占其总能量的 93.22%;再次为高炉煤气和焦炉煤气,占比分别为 4.32% 和 1.11%,其余能源占比较小,均不超过 1%。从体现能的角度分析,高炉煤气对供热的体现能的贡献率最高,达到 53.61%,其次为原煤、转炉煤气和焦炉煤气,占比分别为 36.77%、4.78% 和 3.30%,其余能源占比较小,均不超过 1%;原煤对火力发电的体现能贡

献率最高,达到 61.68%,其次为高炉煤气、转炉煤气和焦炉煤气,占比分别为 33.20%、2.03% 和 1.85%,其余能源占比较小,均不超过 1%。

由此可见,原煤的直接使用在“京津冀”地区的煤炭相关产业链中占有非常大的比重。将体现能角度分析的结果与能量角度分析的结果对比,可以发现煤化工产业在煤炭相关产业链中的潜在能量消耗仍然具有相当的贡献。

(3)煤炭终端消费环节的能量流动特点。从能量的角度分析,焦炭为终端消费提供的能量在所有能源中比重最大,达到 47.78%,其次为原煤和洗精煤,占比分别为 37.64% 和 4.31%,其余能源占比较小,均不超过 4%。在各种类型的终端消费中,工业耗能比重最高,达到 89.38%,其次为生活消费和其他消费,占比分别为 5.81% 和 2.57%,其余种类终端消费占比较小,均不超过 1%。从体现能的角度分析,焦炭对终端消费的体现能的贡献率最高,达到 41.28%,其次为高炉煤气和原煤,占比分别为 24.41% 和 21.83%,其余能源占比较小,均不超过 5.5%。在各种类型的终端消费中,工业体现能占比最高,达到 92.72%,其次为生活消费和其他消费,占比分别为 4.42% 和 1.54%,其余种类终端消费占比较小,均不超过 0.5%。

由此可见,焦炭是终端消费能量的主要来源,也是体现能的主要贡献源。对于终端消费而言,无论从能量的角度还是体现能的角度,工业都占到了其总量的绝大多数(约 90%),有效地调控工业煤炭资源使用,对于提高能源利用效率具有重要的意义。

(4)能源利用效率。根据表 4,将煤炭转化过程中洗选煤、煤制品加工、炼焦的产品与原料转化为能量,代入式(6)中,可以得到煤炭转化能源利用效率(见表 5)。

(5)“京津冀”地区 2012 年煤炭相关产业链污染物排放分析。具体见图 3。

根据图 3,在“京津冀”地区 2012 年煤炭相关产业链中 NO_x 的主要贡献因子分别为原煤(55.10%)和焦炭(36.47%); CO 的主要贡献因子分别为原煤(42.97%)、焦炭(28.44%)和炼焦过程(22.31%); NMVOC 的主要贡献因子分别为原煤(38.75%)、焦炭(25.64%)和炼焦过程(24.20%); SO_x 的主要贡献因子分别为原煤(57.57%)和焦炭(38.10%); TSP 的主要贡献因子分别为炼焦过程(56.29%)、原煤(25.23%)和焦炭(16.70%); PM_{10} 的主要贡献因子分别为炼焦过程(64.98%)、原煤(20.20%)和焦炭(13.37%); $\text{PM}_{2.5}$ 的主要贡献因子分别为炼焦过程(72.56%)、原煤(15.79%)和焦炭(10.45%)。

结果表明,原煤、焦炭的直接消费和炼焦过程对“京津冀”地区 2012 年煤炭相关产业链七种主要污染物的贡献率最大。为了有效减少“京津冀”地区煤炭相关

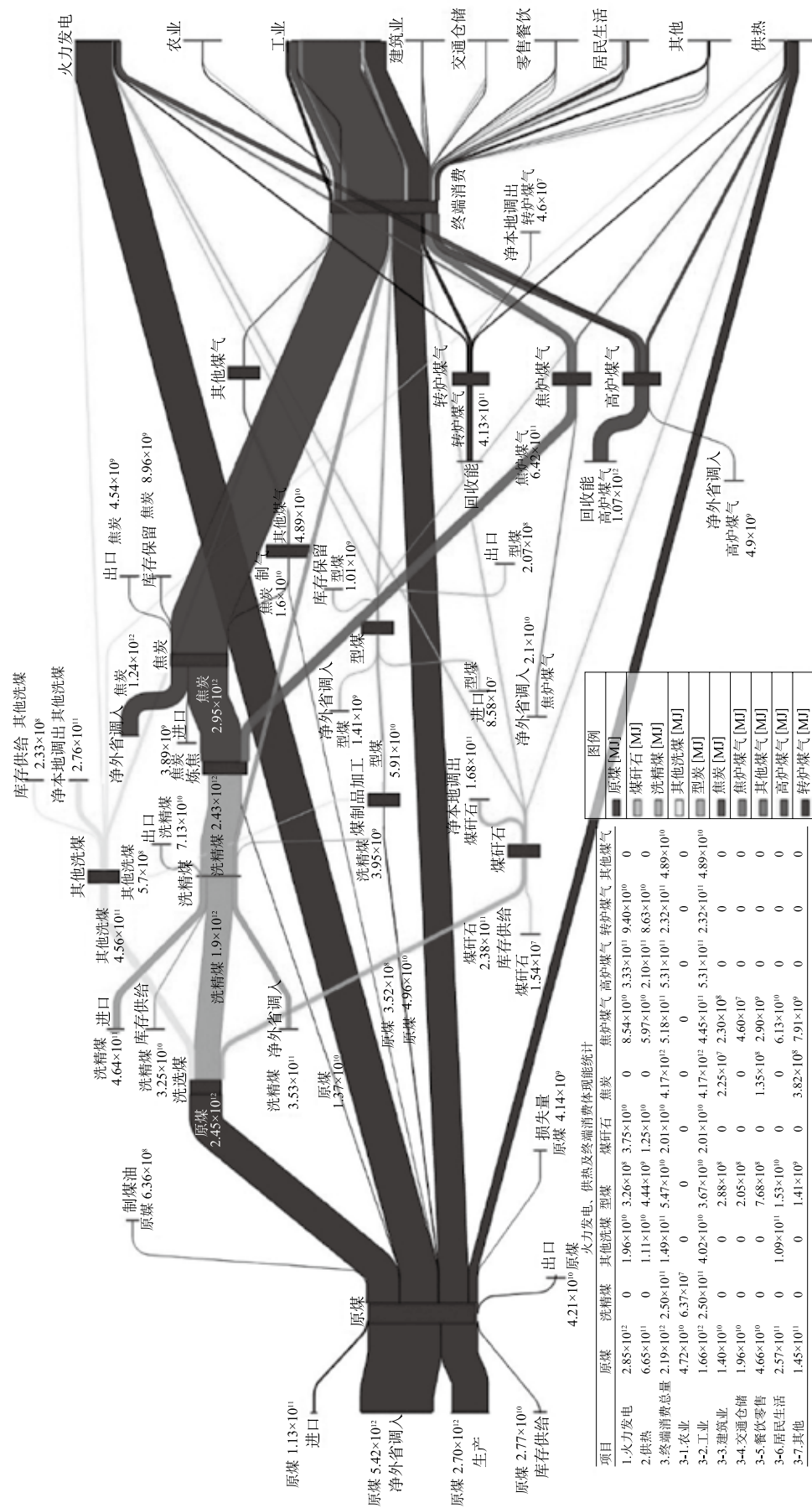
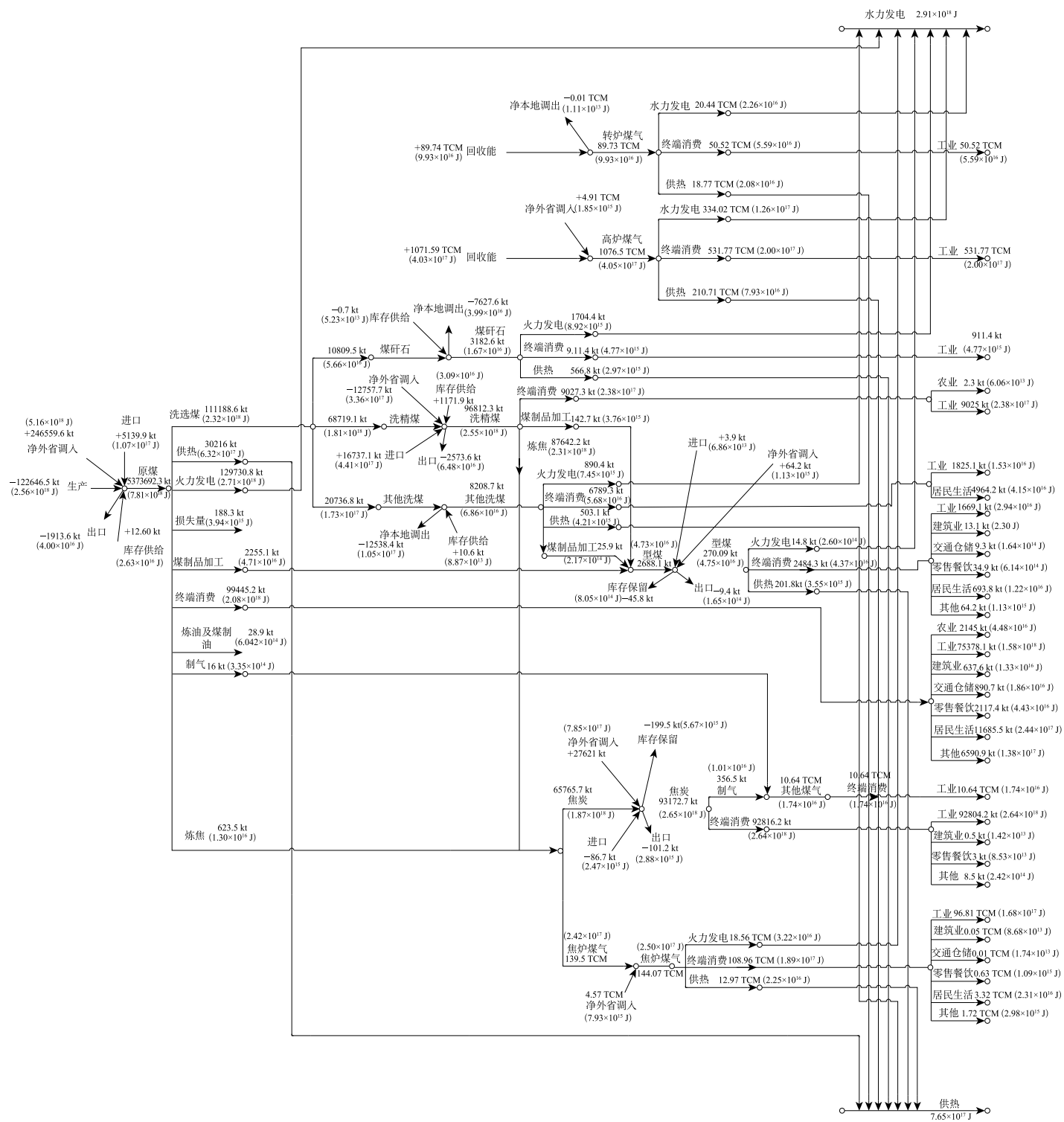


图1 “京津冀”地区2012年体现能流程图



产业链的污染物排放, 需要对原煤、焦炭的直接消费和炼焦过程采取相应的减排政策和措施。

3.2 讨论

将“京津冀”地区 2012 年的煤炭相关产业链现状与胡秀莲^[56] 研究中呈现的中国 2012 年的煤炭相关产业链现状 (图 4、表 5) 对比, 可以得到如下结果, 见图 5。

(1) 从原煤供应的角度, 2012 年中国原煤供应 94.83% 依靠本地生产, 基本可以保证煤炭资源供应的自给自足; 而 2012 年“京津冀”地区煤炭供应则主要依靠外省调入。

(2) 在煤流图的分能源品种构成中, 2012 年“京津冀”地区原煤直接使用比例为 21.64%, 电力占比 30.29%, 焦炭及其制品占比 29.44%, 热力占比 7.96%, 煤制油气、型煤、洗选煤及其他占比 10.67%。在中国 2012 年煤流图的分能源品种构成中, 原煤直接使用比例为 33.7%, 电力占比 28.1%, 焦炭及其制品占比 26.6%, 热力占比 6.8%, 煤制油气、型煤、洗选煤及其他占比 4.8%。在终端消费构成上, “京津冀”地区工业比重为 89.38%, 中国的工业比重为 80.2%, 都占到了终端消费能量消耗的绝大多数。

在煤炭转化能源利用效率上, “京津冀”地区 2012 年煤炭相关产业链洗选煤、煤制品加工、炼焦三个环节的效率分别为 87.77%、92.46%、90.97%, 稍低于中国 2012 年 96.16% 的利用效率^[56]。

结果表明, “京津冀”地区的煤炭相关产业链是中国煤炭相关产业链的比较典型的代表, 优化调整“京津冀”地区的煤炭相关产业链对于中国煤炭相关产业链的发展具有代表性意义。

4. 结论与建议

根据“京津冀”地区煤炭相关产业链的现状, 为了提高能源利用效率, 减少体现能和污染物排放, 可以采取以下措施改进煤炭相关产业链, 在保证能源安全的前提下减少污染。

(1) 煤化工是煤炭相关产业链中的关键环节, 也是能源消耗、污染物排放的突出环节。目前, “京津冀”地区应该进一步改造煤化工产业布局, 在煤焦化等领域淘汰落后产能, 关停小规模企业, 整合大型企业; 以煤气化推动煤制合成氨技术改造, 同时积极开发利用焦炉煤气、煤焦油等副产

品。对于新建设的煤化工企业, 要以更严格的技术指标进行要求, 遵循成规模、成集群、循环利用的原则。

(2) 供热和发电是煤炭消费的主要途径之一。目前, “京津冀”地区还有一定存量的落后锅炉。对此, 可以一方面应该加速对落后锅炉的淘汰; 另一方面要加强对锅炉的污染处理, 进行除尘、脱硫改造。对新安装的具有一定规模的锅炉要进行在线联网监测, 及时监督。此外, 还应该积极鼓励各地采取集中供热方式供暖, 并利用使用煤气、天然气的锅炉取代小型煤炭锅炉。

(3) 在煤炭的终端消费中, 居民生活消费和其他消费的能源消耗与污染物排放也占有相当比重, 需要进一步加以整治。目前, 一方面可以扩大城市高污染燃料禁用范围, 在城市和城乡结合部采取政策补偿措施, 推行

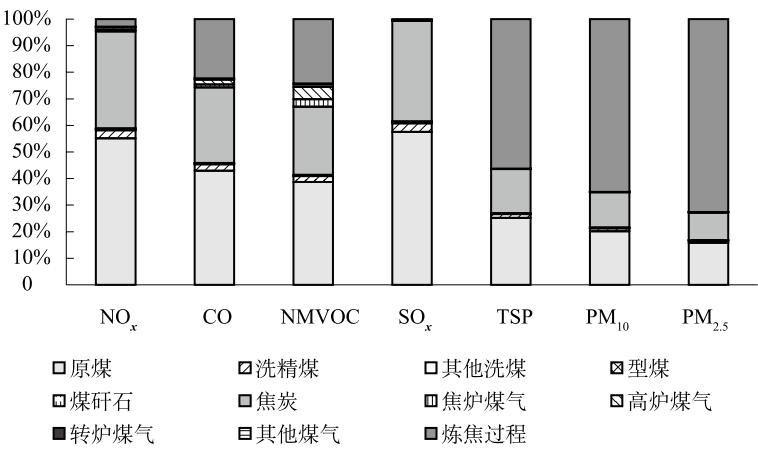


图3 “京津冀”地区2012年煤炭相关产业链主要污染物排放分析

表5 煤炭转化能源利用效率

转化项目	产品/J	原料/J	效率
洗选煤	2.04×10^{18}	2.32×10^{18}	87.77%
煤制品加工	4.73×10^{16}	5.11×10^{16}	92.46%
炼焦	2.11×10^{18}	2.32×10^{18}	90.97%

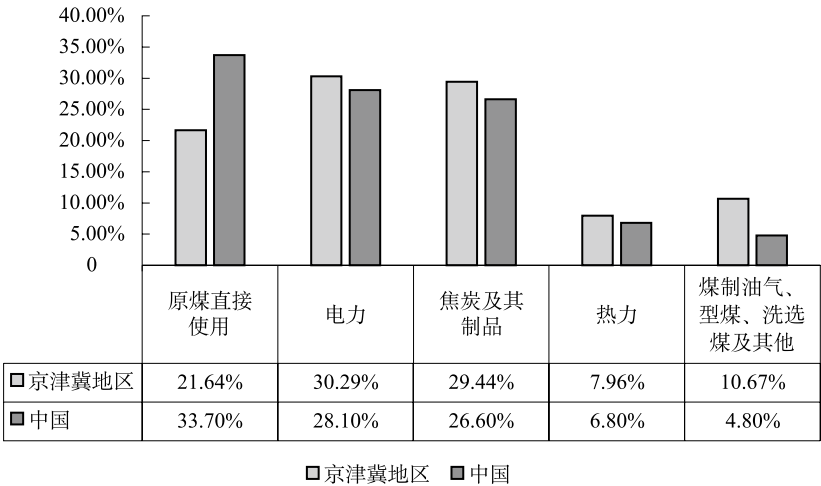


图5 “京津冀”地区与中国煤炭资源使用情况对比

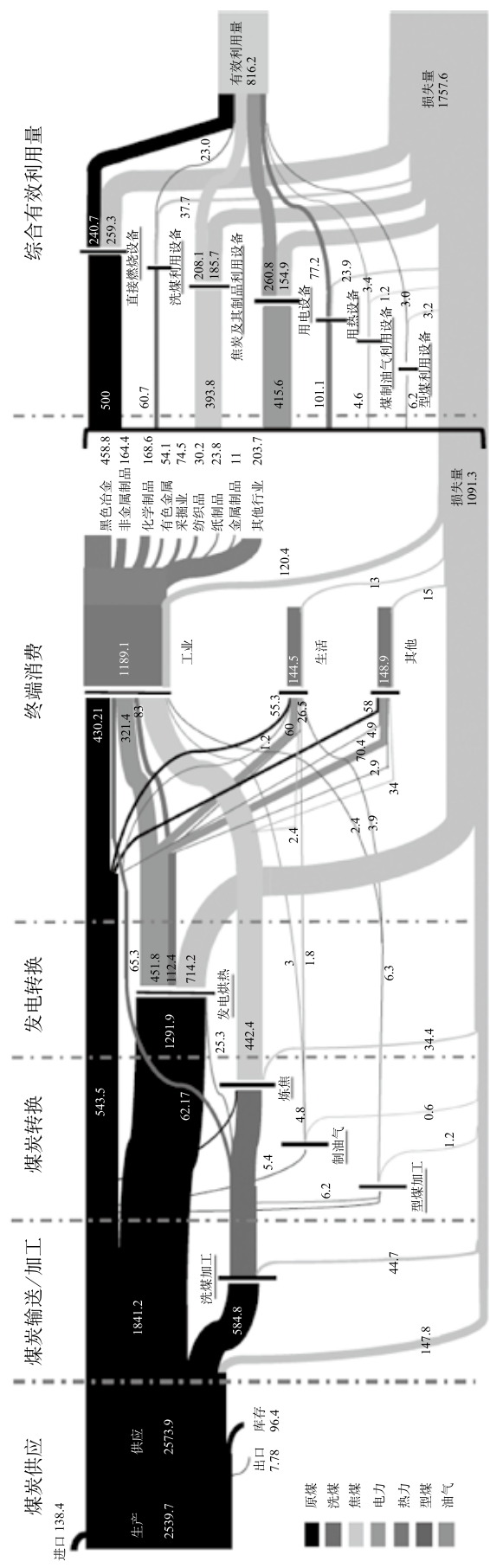


图4 中国2012年煤流图 (单位: 10⁴t标准煤)

天然气、电力替代民用散煤,在农村推广沼气、风能、太阳能等清洁能源,压缩煤炭使用范围。另一方面,可以制定严格的民用煤炭的产品标准,对灰分、硫分、挥发分进行管控,对于劣质煤、高污染煤全面禁止生产和销售。此外,对必须使用煤炭的地区还可以采取政府补贴的方式,推广先进煤炭炉具,提高能源利用效率,降低污染排放。

(4) 煤炭洗选是原煤加工的重要过程。根据目前“京津冀”地区的煤炭资源利用现状,可以通过高精度煤炭洗选,分质分级,提高煤炭洗选加工技术水平,增强煤炭产品质量。同时,加强对《商品煤质量管理暂行办法》的执行力度,进一步推广洁净型煤处理技术和高浓度水煤浆处理技术。

参考文献

- [1] 北京市环保局. 2015 年北京市环境状况公报 [R]. 北京: 北京市环保局, 2016.
- [2] 环境保护部. GB3095—2012 环境空气质量标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [3] 河北省环保厅. 2016 年河北省环境保护工作会议简报 [R]. 石家庄: 河北省环保厅, 2016.
- [4] 天津市环保局. 2015 年天津市环境空气质量状况 [R]. 天津: 天津市环保局, 2016.
- [5] 杨维, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析 [J]. 环境科学, 2013, 34 (1): 237-243.
- [6] 方叠. 中国主要城市空气污染对人群健康的影响研究 [D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [7] 李克强. 2016 年国务院政府工作报告 [R]. 北京: 人民大会堂, 2016.
- [8] 国家发展和改革委员会, 环境保护部. 京津冀协同发展生态环境保护规划 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2016.
- [9] 中华人民共和国国务院. 国家环境保护“十二五”规划 [R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2011.
- [10] 国务院. 大气污染防治行动计划 [R]. 北京: 国务院, 2013.
- [11] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2016.
- [12] 李少聪. 低碳经济下京津冀发展路径研究 [D]. 石家庄: 河北经济贸易大学, 2015.
- [13] 北京市环保局. 北京市 2012—2013 年度 PM_{2.5} 来源综合解析结果 [R]. 北京: 北京市环保局, 2014.
- [14] 天津市环保局. 天津市颗粒物源解析 [R]. 天津: 天津市环保局, 2014.
- [15] 河北省环保厅. 河北 11 市完成 PM_{2.5} 源解析 [R]. 石家庄: 河北省环保厅, 2015.
- [16] 孟亚东, 孙洪磊. 京津冀地区“煤改气”发展探讨 [J]. 国际石油经济, 2014 (11): 84-90.
- [17] HIRSCHMAN A O. The Strategy of Economic Development[M]. New Haven: Yale University Press, 1958: 38-41.
- [18] 龚勤林. 区域产业链研究 [D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [19] 郁义鸿. 产业链类型与产业链效率基准 [J]. 中国工业经济, 2005 (11): 35-42.
- [20] 全诗凡. 基于区域产业链视角的区域经济一体化 [D]. 天津: 南开大学, 2014.
- [21] 陈朝隆, 陈烈, 金丹华. 区域产业链形成与演变的实证研究——以中山市小榄镇为例 [J]. 经济地理, 2007, 27 (1): 64-67.
- [22] SHRESTHA R M, MARPAUNG C O P. Supply- and demand-side effects of carbon tax in the Indonesian power sector: an integrated resource planning analysis[J]. Energy policy, 1999, 27 (4): 185-194.
- [23] 刘强, 姜克隽, 胡秀莲. 碳税和能源税情景下的中国电力清洁技术选择 [J]. 中国电力, 2006, 39 (9): 19-23.
- [24] ADEN N, FRIDLEY D, ZHENG N N. China's Coal: Demand, Constraints, and Externalities[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.
- [25] 濮洪九. 中国煤炭可持续开发利用及环境对策研究 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [26] 于飞飞. 基于煤炭供应链的煤流图方法及应用研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [27] 赵剑峰. 低碳经济视角下煤炭工业清洁利用分析及政策建议 [J]. 煤炭学报, 2011, 36 (3): 514-518.
- [28] FANKHAUSER S, HEPBURN C. Designing carbon markets. Part I: carbon markets in time[J]. Energy policy, 2010, 38 (8): 4363-4370.
- [29] FANKHAUSER S, HEPBURN C. Designing carbon markets, Part II: carbon markets in space[J]. Energy policy, 2010, 38 (8): 4381-4387.
- [30] 袁迎菊. 煤炭产业链低碳演化机理及路径优化研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2012.
- [31] DINCER I, ROSEN M A. Energy, environment and sustainable development[J]. Applied Energy, 1999, 64 (1-4): 427-440.
- [32] 周志田, 杨多贵. 虚拟能——解析中国能源消费超常规增长的新视角 [J]. 地球科学进展, 2006, 21 (3): 320-323.
- [33] 齐晔, 李惠民, 徐明. 中国进出口贸易中的隐含能估算 [J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18 (3): 69-75.
- [34] 刘峰. 中国进出口贸易能源消耗问题的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [35] 公丕芹, 冯超. 中国隐含能存量测算及政策启示 [J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23 (9): 75-81.
- [36] 马涛. 中国对外贸易中的生态要素流分析 [D]. 上海: 复旦大学, 2005.
- [37] 孙玮. 中国能源贸易及对外贸易中的体现能分析 [D]. 天津: 南开大学, 2008.
- [38] 罗思平, 王灿, 陈吉宁. 中国国际贸易中隐含能的分析 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2010, 50 (3): 477-480.
- [39] 庞军, 石媛昌, 闫玉楠, 等. 我国出口贸易隐含能及其影响因素的分解分析 [J]. 经济问题探索, 2012 (3): 103-109.
- [40] YOHANIS Y G, NORTON B. Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK[J]. Energy, 2002, 27 (1): 77-92.
- [41] COSTANZA R. Embodied energy and economic valuation[J]. Science, 1980, 210 (4475): 1219-1224.
- [42] 张力小, 冯悦怡, 胡秋红. 城市能源系统的体现能过程解析——以北京市为例 [J]. 能源科学发展, 2013, 1 (3): 22-30.
- [43] KAHRL F, ROLAND-HOLST D. Energy and exports in China[J]. China economic review, 2008, 19 (4): 649-658.
- [44] RAHIMIFARD S, SEOW Y, CHILDS T. Minimising embodied product energy to support energy efficient manufacturing[J]. CIRP annals, 2010, 59 (1): 25-28.
- [45] KARA S, MANMEK S, HERRMANN C. Global manufacturing

- and the embodied energy of products[J]. CIRP annals, 2010, 59 (1) : 29-32.
- [46] LI H, ZHANG P D, HE C Y, et al. Evaluating the effects of embodied energy in international trade on ecological footprint in China[J]. Ecological economics, 2007, 62 (1) : 136-148.
- [47] 刘峰. 我国贸易分散的实证研究 :1980-2005 年 [J]. 国际贸易问题, 2007, 11:3-8.
- [48] CHEN Y, PAN J H, XIE L H. Energy embodied in goods in international trade of China: Calculation and policy implications[J]. Chinese journal of population resources and environment, 2011, 9 (1) : 16-32.
- [49] LIU H T, XI Y M, REN B Q, et al. Embodied energy use in China's infrastructure investment from 1992 to 2007: Calculation and policy implications[J]. The scientific world journal, 2012, 2012: 858103.
- [50] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [51] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 2589—2008 综合能耗计算通则 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [52] 国家统计局工交司. 能源统计知识手册国家统计局 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [53] 杨勇平, 杨志平, 徐钢, 等. 中国火力发电能耗状况及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (23) : 1-11.
- [54] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [55] 《中国电力年鉴》编辑委员会. 中国电力年鉴 2013[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [56] 胡秀莲. 中国 2012 年能流图和煤流图编制及能源系统效率研究 [R]. 格朗: 世界自然基金会, 2014.
- [57] Lawrence Livermore National Laboratory. Energy flow charts[EB/OL]. (2008-07-31) . <https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy> (2018-03-01)
- [58] JIANG M M, CHEN B, ZHOU S Y. Embodied energy account of Chinese economy 2002—2010 international workshop from the international congress on environmental modeling and software (iEMSs2010) [J]. Procedia environmental sciences, 2011, 5: 184-198.
- [59] European Environment Agency (EEA) . EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook[R]. Luxembourg: European Union, 2013.

Embodied Energy Accounting and Policy Analysis of Coal Industry Chain in Beijing-Tianjin-Hebei Region

LIU Gengyuan^{1,2*}, LU Yiqiong^{3,4*}, CHEN Caocao⁵

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Engineering Research Center for Watershed Environmental Restoration & Integrated Ecological Regulation, Beijing 100875, China; 3. Renmin University of China, School of Environment & Natural Resources, Beijing 100872, China; 4. China National Energy Co., Ltd., Beijing 100011, China; 5. Beijing Climate Change Research Center, Beijing 100031, China)

Abstract: Nowadays, the air pollution of China is more and more serious, especially in Beijing-Tianjin-Hebei region. The energy consumption structure and the pollutants emission of coal industry chain is the main cause of the air pollution. In this study, based on the Energy Balance Tables of Beijing, Tianjin and Hebei province in 2012, we used the model of inter-regional transportation, proposed a Regional Coal Industry Chain Balance Table and clarified the material and energy flows in Beijing-Tianjin-Hebei region; besides we used the input-output method to account the embodied energy as well as 24 kinds of pollutants of coal industry chain in Beijing-Tianjin-Hebei region. Beijing-Tianjin-Hebei region's energy and coal flowchart, as well as the energy efficiencies of different energy transformation divisions within the flowchart are discussed. This study shows the following results: ① The main source of raw coal in Beijing-Tianjin-Hebei region is distribution. In the view of the coal industry chain, Beijing-Tianjin-Hebei is a coal net import region. ② The direct use of raw coal keeps a large proportion Beijing-Tianjin-Hebei region's coal industry chain. By comparing the results of embodied energy analysis with the results of energy analysis, we can find that coal chemical industry still keeps quite a few proportion in the potential energy consumption of coal industry chain. ③ Coke is the main source of energy in terminal consumption link, and it is also the key contributor of embodied energy. In terms of the terminal consumption link, whether from the side of energy or embodied energy, the industry keeps the vast majority of proportion (About 90%) . We can come to a conclusion that effective control of industrial use of coal resources, has an important significance for improving energy efficiency. ④ The energy utilization efficiency of coal cleaning, coal products processing and coking of coal conversion in Beijing-Tianjin-Hebei region 2012 are 87.77%, 92.46 and 90.97%, a little less than the energy utilization efficiency of coal conversion in China 2012 (96.16%) . ⑤ The direct use of raw coal, coke and the coking process are the key contributors to the 7 main pollutants of coal industry chain in Beijing-Tianjin-Hebei region 2012. Taking corresponding measures to the direct use of raw coal, coke and the coking process is an effective way to reduce the emissions of coal industry chain in Beijing-Tianjin-Hebei region. This study can provide some theoretical support and policy suggestions to improve the energy utilization efficiency, reduce the consumption of embodied energy and reduce the emissions of coal industry chain in Beijing-Tianjin-Hebei region.

Keywords: Beijing-Tianjin-Hebei region; embodied energy; input-output analysis; coal industrial chain; regional emission inventory