

中国能源系统能流、焓流与能效分析

王永真^{1, 2}, 王璇琳³, 林嘉瑜¹, 韩 恺^{1, 2}, 王 丹⁴, 王剑晓⁵, 何继江⁶

- (1. 北京理工大学能源与动力工程系, 北京 100081; 2. 北京理工大学重庆创新中心, 重庆 401120;
3. 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518055; 4. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300192;
5. 北京大学大数据分析与应用技术国家工程实验室, 北京 100871;
6. 清华大学社会科学学院能源转型与社会发展研究中心, 北京 100084)

Energy and Exergy Flows and Energy Efficiency Analysis of China's Energy System

WANG Yongzhen^{1,2}, WANG Xuanlin³, LIN Jiayu¹, HAN Kai^{1,2}, WANG Dan⁴, WANG Jianxiao⁵, HE Jijiang⁶

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Chongqing Innovation Center, Beijing Institute of Technology, Chongqing 401120, China;

3. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China;

4. Key Laboratory of Smart Grid, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300192, China;

5. The National Engineering Laboratory of Big Data Analysis and Application Technology, Peking University,
Beijing 100871, China;

6. Research Center for Energy Transition and Social Development, School of Social Sciences, Tsinghua University,
Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The energy sector contributed nearly 90% of China's carbon emissions. Therefore, the multi-dimensional quantitative characterization and analysis of energy flow and efficiency of consumption structure has extremely important significance for the top-level design of carbon neutral path. Energy has both quantitative and qualitative attributes. In this paper, quantitative and qualitative analysis of energy system were combined based on the Sankey diagram. At first, energy and exergy flow of China in 2010 and 2020 were studied and depicted from the perspective of the first law of thermodynamics and the second law of thermodynamics respectively. Moreover, from the perspectives of energy production, processing, conversion and consumption, this paper compares and analyzes the energy flow, energy efficiency and loss of each chain of China's energy system. It's also found that China's energy efficiency has steadily improved with the end-energy efficiency from 74.52% in 2010 reaching 79.04% by 2020. At the same time, China's energy structure has been transformed to green and low-carbon. However, during the same period, China's energy system efficiency is only 17.44% and 23.91%, respectively, which is far below the energy efficiency. The exergy analysis shows that there is a great loss within the energy system from the energy perspective, including the low-quality utilization of high-quality electric energy and heat energy in the process of electrification, irreversible loss in the process of primary energy combustion, etc. Based on this, the idea of energy efficiency in China from energy perspective to exergy perspectives is put forward under the carbon peaking and carbon neutrality goals and four suggestions are put forward at the same time.

KEY WORDS: energy transformation; energy flow diagram; exergy flow diagram; carbon peak and neutrality; energy conservation; energy efficiency

摘要: 能源领域贡献了中国近90%的碳排放, 对能源系统能流与能效的多维刻画及分析对碳中和路径的顶层设计具有

基金资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金(52006114); 新疆自治区重点研发计划(2022B01018-2)。

Project supported by the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (52006114), the Key R&D Program of Xinjiang Uygur Autonomous Regions (2022B01018-2).

极其重要的作用。能量具有“数量”与“品质”的双重属性，将能量的数量分析法和品质分析法相结合，分别从热力学第一定律能流和热力学第二定律焓流的视角，研究并刻画了2010年和2020年中国能源系统的能流图和焓流图。并从能源生产、加工、转换、消费等角度，对比分析了中国能源系统能源各链条能流、能效与损失的特征。发现2010年和2020年中国终端能源效率从74.52%提升至79.04%，同时能源结构向绿色低碳转型。但同期中国能源系统的焓效率分别为17.44%和23.91%，能源转换的焓损失仍较大，存在大量的电能低质利用、热能不匹配利用、能源原料燃烧利用等过程。最后，就双碳目标下中国能源效率从能流视角走向焓流视角的提出了相关建议。

关键词：能源转型；能流图；焓流图；双碳；节能；能效

0 引言

人类文明的每一次重大变革都伴随着能源的更替及能源系统的改进。当前，为应对全球气候变化的挑战，世界能源发展已进入以无碳化为核心内容的第三次能源变革时代^[1]。截至2023年12月，全球有151个国家明确提出“碳达峰、碳中和”相关愿景，覆盖全球碳排放的88%和GDP的92%^[2]。作为世界上最大的能源消费和碳排放国。2020年9月，中国宣布“争取在2030年前实现CO₂排放达到峰值，在2060年前实现碳中和”。但双碳目标的实施过程面临着政治、资源、技术、市场、能源等诸多挑战。2012年以来，中国以年均2.9%的能源消费增长支撑了年均6.2%的国民经济增长^[3]，中国能源消费总量过快增长势头得到有效控制，能源消费结构调整取得历史性进展。但进入双碳目标的新征程，中国能源系统也面临更大的挑战。进而，如何推动能源系统将走向更深化、更精准的能效提升，准确刻画和分析能源系统的效率和损失，并基于此挖掘能源系统提质增效的环节及其潜力是一切行动的前提。因此，对能源系统的能源供给及能效特征的深度解析是能源系统可持续发展的重要支撑，对中国双碳目标的顶层设计具有重要意义。

能源流动的特征研究是全球能源发展演变研究的重要内容。其中，基于能量守恒定律的典型能流分析法能够简单明了地展现了能源的数量流动，揭示区域、国家、省域甚至某个能源系统能源的输入、转换、消费和输出的特征^[4]。桑基图作为能源流动刻画和展示的有效工具，在分析能源消耗、确定消耗环节和改进能流分配等方面展现

了重要的作用，并在近些年开始扩展为焓流与碳流的分析。比如，美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室于1972年首次公布了美国的国家能流图，清晰地展示了美国不同种类能源的流动情况以及各转换环节的利用效率，为美国能源政策的顶层设计提供了强有力的工具；Cullen等人绘制了2005年全球能源分配图，并引入被动系统的概念，以分析能效提升对减少CO₂排放的贡献^[5]；Subramanyam等人绘制了加拿大Alberta省能源供需双方的能流图，展示了主要能源供需部门从能源供给到消费的全过程，为明确消费部门当前效率和温室气体排放提供了建议^[6]。相较于能流分析，焓流分析难度较大，目前全球范围内的研究成果还相对较少，特别是将能流和焓流进行对比的研究鲜有报道。比如，Soundararajan将桑基图的关键特征与不同能源目标相匹配，利用焓分析方法，研究了英国工业供暖的潜在节能方案^[7]；欧洲经济区对意大利2013年至2015年的焓足迹进行分析，并将其与其他可持续性指标和意大利国内生产总值比较，表明焓分析对环境 and 经济因素均具有显著的敏感性^[8]。

自上世纪80年代开始，中国能源消费呈现高速增长态势，并于2009年和2005年分别成为全球第一的能源消费和碳排放国。为摸清中国能源系统的能流分布特征及能效情况，相关学者对中国的能源供给及消费的规模和强度进行系列研究。比如，李政等人参照国际能流图的结构，绘制了中国2003年和2004年的能源桑基图^[9]，揭示了当时中国能源的流动及转换情况；廖华等人利用能源桑基图绘制了2008年中国能流图并对能源结构进行研究，分析中国在能源发展中的阶段^[10]；孙

文文等人绘制了2018年中国能流图和碳流图, 根据能流图分析了中国能源生产、转换和消费3个环节的特征并对中国的碳排放情况进行分析^[11]; 李嘉宇等人根据2019年能源数据, 绘制了2019年中国能流图和碳流图, 并对能源的生产和消费根据能源类型和产业部门进行了分析^[12]。省市区域层面上, 付佳鑫等学者绘制北京市能流图和碳流图, 并对北京能源低碳化模式进行系统分析^[13]; 董东林等人通过绘制山东省2017年能流图, 为《山东省能源中长期发展规划》中所设目标提出发展建议^[14]。在具体能源品类上, Ma等人绘制了中国石油流动的桑基图, 以揭示中国石油供应和消费的物理模式及效率^[15]; Yu等人绘制了2005年和2010年中国煤炭利用的能源流图, 刻画了原煤供应、由煤炭产品供应和煤炭转化、到能源终端利用的4个阶段过程^[16]。

前述文献调研表明, 能流图能够清晰刻画各类能源从供应端直至消费端的储备、供应、加工、转换、分配等总体流动的过程, 能够一定程度反映“节能”的效果。但是要回答何谓节能其实并不简单, 仅考虑热力学第一定律的能流分析难以揭示异质能源的品质和能源转换设备内部不可逆损失, 进而难以挖掘未来多能源耦合下能源系统演变的方向和提质增效潜力。而不同于能流, 基于热力学第二定律的焓流分析能够刻画不同能源及能量的品质, 揭示不同温度、压力及状态能量在参考状态下的最大可用功。可以说, 从能量利用品质角度看, 进入新发展格局下的“节能”实质上是对常规能源中的可用能“焓”的节约与利用。

基于此, 本文将能量的数量分析法和品质分析法相结合, 基于Sankey图的能源平衡表分析手段, 分别从热力学第一定律能流和热力学第二定律焓流的视角, 研究并刻画2010年和2020年中国能源流动的能流图和焓流图。其次, 并从能源生产、加工、转换、消费等角度, 对比分析了近年来中国能源系统各链条的能流、能效与损失的特征。最后, 本文对双碳目标下中国能源效率从能流视角走向焓流视角进行了分析和展望, 为新发展格局下能源系统能效提升走向深水区提出相关

建议, 以对中国双碳路径的顶层设计提供参考。

1 模型

能量具有“数量”和“品质”的双重属性。热力学第一定律从“数量”的角度阐述了能量转换的客观规律。基于热力学第二定律能量的“品质”属性, 通过焓的方法可以更为深度的揭示了能量转换的另一个客观规律, 即能量在转换过程中其品质会发生贬值。由于能量的数量并不会改变, 因此所谓的“能量损耗”其本质是品质损耗, 所谓的“能源紧缺”其本质是高品质、可利用的能源紧缺。因此, 能源系统中所提倡提高综合能效的根本目的, 其实质是在能源生产、转换、传输、分配及利用的过程中, 尽可能地避免能量的品质损耗。因此, 本文采用能流图和焓流图的方式对中国能源系统的能效演变进行研究和分析。能流图和焓流图的绘制流程如图1所示。

1.1 能流图及其绘制方法

能流图是基于能量输入输出的平衡机制, 从热力学第一定律角度表征某一组织的能量流动状况的图示, 能流图可以清晰反应该组织能源的输入、转换、损失以及消费的特征。如前述, 能流图一般可以表示为桑基能量分流图, 即桑基图。

1.1.1 能流图绘制过程

本文以《中国能源统计年鉴2011》^[17]和《中国能源统计年鉴2021》^[18]中能源平衡表作为基本数据。如图1所示, 能流图绘制过程中主要需要进行能源品类合并、一次能源产量和进口量核算、能源转换计算和能源消费端核算等流程。在能流图绘制的过程中, 为清晰直观展现能源的流动情况, 将繁多能源品类和产业部门进行合理的合并: 1) 将输入侧能源分为五大类, 即煤炭、石油、天然气、电力和其他能源。其中, 电力为本国可再生能源电力以及核电的输入。将原煤、洗精煤、其他洗煤、煤制品、煤矸石、焦炭、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、其他煤气、其他焦化产品均归纳为煤炭, 将原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、石脑油、润滑油、石蜡、溶剂油、石油沥青、石油焦、液化石油气、煤场干气、其他石油

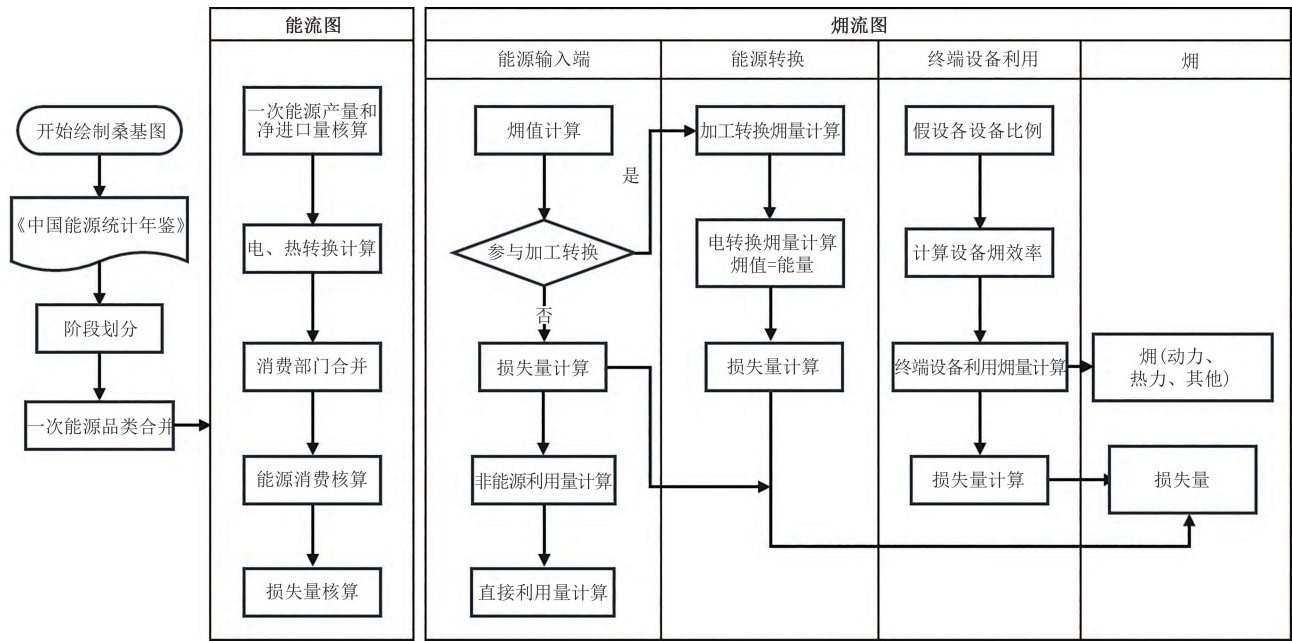


图1 能流图和焓流图绘制流程

Fig. 1 Energy flow diagram and flow diagram drawing process

制品归于石油，将天然气和液化天然气归于天然气；2) 在终端消费侧，根据《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017) 的规定，将农、林、牧、副、渔业设置为第一产业，将工业和建筑业合并为第二产业，将交通运输、仓储和邮政业，批发和零售业、住宿和餐饮业和其他产业合并为第三产业。同时，将居民生活单独计算。

在能源平衡表中，满足能量守恒，即满足式 (1)：

$$S_j + T_j - L_j - C_j = S_{Dj} \quad (1)$$

式中： j 表示能源品类； S 表示可供本地区消费能源量； T 表示加工转化量； L 表示损失量； C 表示终端消费量； S_D 表示平衡差额。

在能量转换的计算过程中，需要计算转换过程的损失量，如式 (2) 所示，转换为 i 能源过程中的损失量为 L_i ； S_{ji} 为 j 能源转换为 i 能源过程中的投入量； T_i 为 i 能源加工转换产出量。

$$L_i = \sum_j S_{ji} - T_i \quad (2)$$

1.1.2 能流图绘制边界和假设

能流图绘制时，将能源在运输、加工转换过程中存在的损失划归为损失量。并进行以下假设和边界设定：1) 境内(外)飞机和轮船在境内(外)的加油量归于进(出)口量；2) 损失量由

两部分构成：一是在生产运输等过程中实际构成的损失；二是在加工转换过程中产生的能量损失。

1.2 焓流图及其绘制方法

焓能够反应能量的品质差异，理论上将该部分能量所具有的最大有用功，称为焓。焓作为一种评价能量品质的参数，从“数量”和“品质”两个方面规定了能量的特征。焓分析过程中，本文将能源利用阶段划分为能源输入端、能源转化、终端利用并最终转化为有用能源。

1.2.1 焓效率计算方法论

采用黑箱模型的方法计算系统的焓效率：不考虑系统内部能量转换过程，只考虑系统外部输入和输出。外部向能源系统输入焓值为 E_{in} ，经过内部能量转换等系列操作，由系统向外界输出的焓值为 E_{out} ，两者之间的差值即能量转换过程中的焓损失 E_{loss} 。能量转换过程的焓效率 η_{ex} 定义为：

$$\eta_{ex} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (3)$$

进一步对输入系统的每一中能量形式的焓都用其能质系数表示，则式 (3) 可改写为：

$$\eta_{ex} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{\sum_{j \in \Omega_{out}} Q_{out,j} \cdot \lambda_{out,j}}{\sum_{i \in \Omega_{in}} Q_{in,i} \cdot \lambda_{in,i}} \quad (4)$$

式中： Ω_{out} 和 Ω_{in} 为能量输出和输入的集合； $Q_{out,j}$

为第 j 类能量形式的输出能量值; $\lambda_{out,j}$ 为第 j 类输出能量的能质系数; $Q_{in,i}$ 为第 i 类能量形式的输入能量值; $\lambda_{in,i}$ 为第 i 类输入能量的能质系数 (能质系数定义为能量烟值与其能量值之比)。进一步假设能量转换装置只存在一种能量输入形式, 且有用输出能量形式也仅为一种, 则式 (4) 进一步写为:

$$\eta_{ex} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \cdot \frac{\lambda_{out}}{\lambda_{in}} = \eta \cdot \frac{\lambda_{out}}{\lambda_{in}} \quad (5)$$

式中: η 为能量转换效率。根据式 (5), 只需要明确各设备的 λ_{out} 和 λ_{in} , 即可求得单设备的烟效率。不同种能量的能质系数计算式如表 1 所示。

表 1 不同能量形式的能质系数^[19]

Table 1 Energy coefficients of different energy forms

能量形式	能质系数计算方法
电能、机械能	$\lambda_e = \lambda_c = 1$
热量	$\lambda_Q = 1 - \frac{T_0}{T_h}$
冷量	$\lambda_{QC} = \frac{T_0}{T_l} - 1$
固体化石燃料	近似为 1

注: T_0 为环境温度; T_h 为高温热源温度; T_l 为低温热源温度。

1.2.2 烟流图的绘制过程

如图 1 所示, 烟流图绘制时能源流动阶段划分为 4 个节点。在每个节点烟值进行计算时, 具体计算如下: 1) 能源输入端, 一次能源按照化石燃料烟值进行计算; 2) 能源转换, 能源转换主要包括电转换和热转换, 热转换归于各类一次能源燃烧, 电转换参考表 1, 即电烟值等于能量值, 能量值数据来自能源平衡表; 3) 终端设备利用, 首先假设此环节各终端设备的利用比例, 确定比例后需根据设备的烟效率计算终端设备利用后的烟值; 烟效率在理论计算的基础上进一步进行合理假设并纳入更多的终端设备, 最终采用的设备烟效率如表 2 所示; 4) 有用烟, 每个节点处的烟损失最终归于损失量, 根据转换设备输出的能源用处, 将其分类为电力、热力和其他项 (照明、制冷等)。

1.2.3 烟流图绘制边界和假设

不同于能流图的环节划分, 在绘制烟流图时进行以下假设及设定: 1) 不区分同一类型能源转换过程中烟变化的差异, 即不考虑煤炭在不同温度燃烧所造成的不同烟效率, 取统一的估算值进

表 2 各转换环节或设备烟效率

Table 2 Each conversion link or equipment efficiency

转换环节或设备	烟效率/%	
	2010年	2020年
柴油机	28	35
汽油机	25	31
航空发动机	41	50
农用机械	28	35
其他发动机	16	21
电动机	46	56
石油燃烧	13	18
天然气燃烧	7	7
煤炭燃烧	16	19
电热器	25	26
电冷却装置	6	7
电子装置	7	9
照明	13	18

行计算; 2) 针对转换装置的类型和比例, 因目前难以对终端用能设备的用能比例进行统计与审核, 参考文献对能量转换的环节的分配比例进行一定的假设^[20]。即在油气适用方面, 规定工业、建筑、批发和零售业、住宿和餐饮业中 95% 的汽油使用归于汽油机, 35% 的柴油利用归于柴油机, 农、林、牧、副、渔业中 100% 的汽油使用归于汽油机, 95% 的柴油利用中柴油机和农用机械各占 50%, 其余均归于直接燃烧; 交通运输业的所有天然气使用归于其他发动机。电力使用方面, 电动机占 54.0%、电压压缩制冷占 15.5%、照明占 14.1%、电子装置占 7.8%、电热器占 7.2%、其他发动机占 1.4%。

2 结果分析

2.1 中国能源系统能流的演变及分析

2.1.1 能源生产与消费总体情况

2010 年和 2020 年中国能源系统的能流图如图 2 和图 3 所示。总体来看, 2010 年和 2020 年中国一次能源的生产总量分别为 81.87 EJ 和 106.66 EJ。其中, 一次能源生产总量中煤炭占比由 2010 年 81.27% 下降到 2020 年 75.39%, 降低了 5.9%。同期, 中国原油消费增多, 但生产量逐年下降, 2020 年石油生产量占一次能源生产量的比重相比于 2010 年下降 2.73%, 导致石油的对外依存度上升。此外, 风、光、水、核等清洁电力的生产及其他清洁能源在中国能源结构供给中的比重不断

增大，特别是可再生能源在能源生产中比重从2010年5.2%增加到2020年的10.2%。另一方面，从消费端看，第一、第二、第三产业和生活消费量分别为1.98 EJ、71.49 EJ、18.29 EJ和13.00 EJ。其中，第二产业在能源消费中占据绝对比重，2020年第二产业占终端能源消费比重为68.2%，较2010年的70.84%有所降低。当前中国第二产业及高耗能产业比重相对较高，因此，在以煤为主的能源消费结构下，推动第二产业向第三产业结构转型、电气化率提升、先进节能技术的普及，将

是未来节能减排的关键路径。从图2和图3可以看出，以电气化率（全国电能占终端能源消费比重）为例，2010年至2020年，中国能源系统的电气化率大约从17.1%增加到25.1%，电气化率取得较大提升，在全球主要国家中位居前列。但中国终端用能仍以热能为主，2020年终端热能及能源原料消费占比高达74.9%。因此，热能的清洁化、电气化替代将是中国能源系统转型的关键，特别是北方乡村采暖、长江中下游地区采暖和各类型工业蒸汽用热的替代。

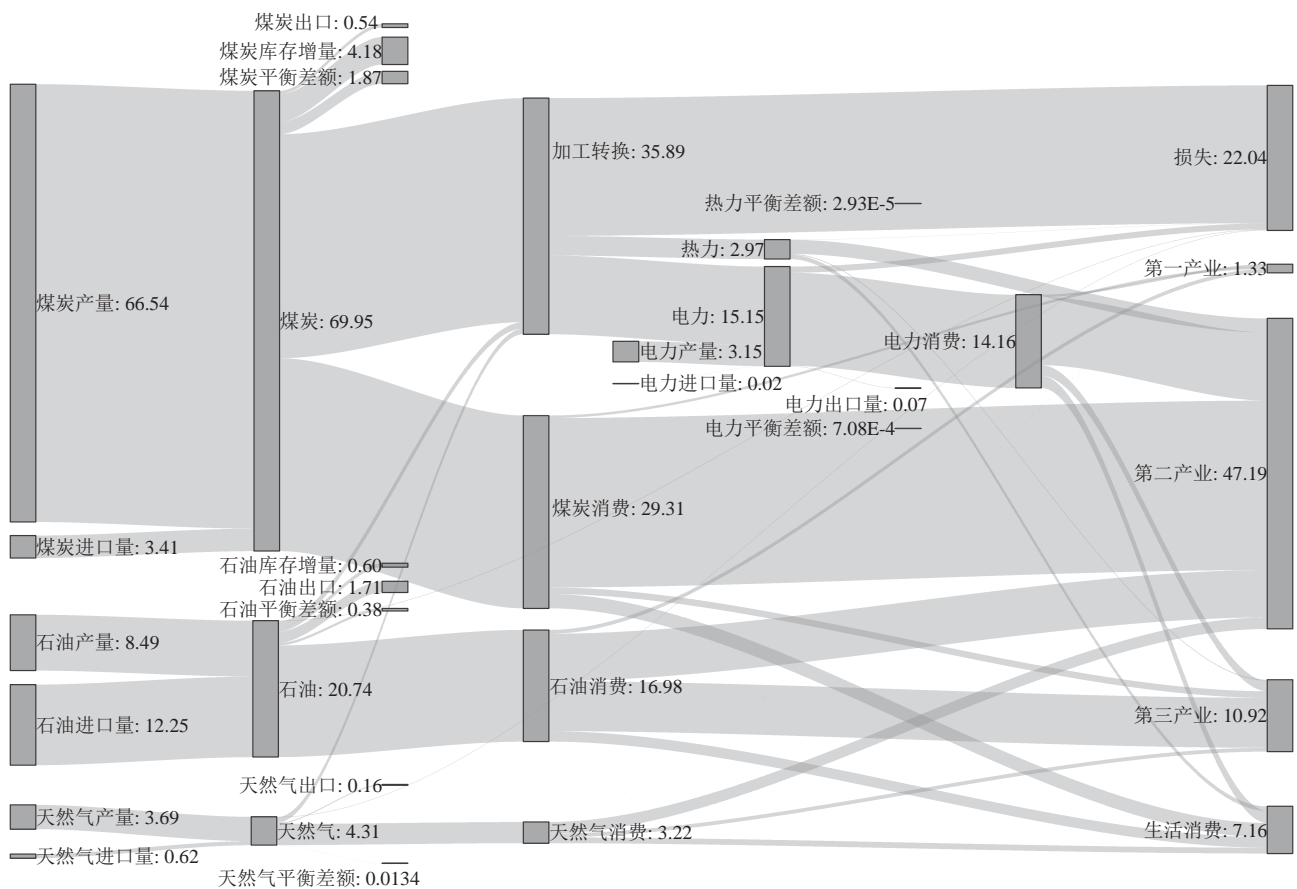


图2 2010年中国能源系统能流图 (单位: EJ)

Fig. 2 China's energy flow chart in 2010

2.1.2 一次化石能源消费利用分析

对煤炭、石油和天然气三大化石能源的能流特征进行分析，发现：1) 煤炭类2020年中国火力发电投入能量42.76 EJ、供热投入能量7.11 EJ，与2010年相比，分别增加了42%和100%。在煤炭直接利用上，如图4所示，煤炭直接消费主要以第二产业为主，说明了煤炭在加工制造业中的重要地位；2) 原油依然是重要的燃料和工业原料。近十年

来中国的石油消费持续增长，由2010年16.98 EJ的能源消费增长到2020年26.25 EJ。同时，相较于2010年进口量12.25 EJ，2020年中国原油进口量进一步上升至25.68 EJ。如图4，与煤炭不同，石油的直接消费在第三产业占比较大，其消费占比为80%；3) 天然气作为清洁能源对中国清洁供热做出了较大的贡献。天然气在加工转换阶段向火力发电投入1.70 EJ、供热投入0.67 EJ，比2010年分别

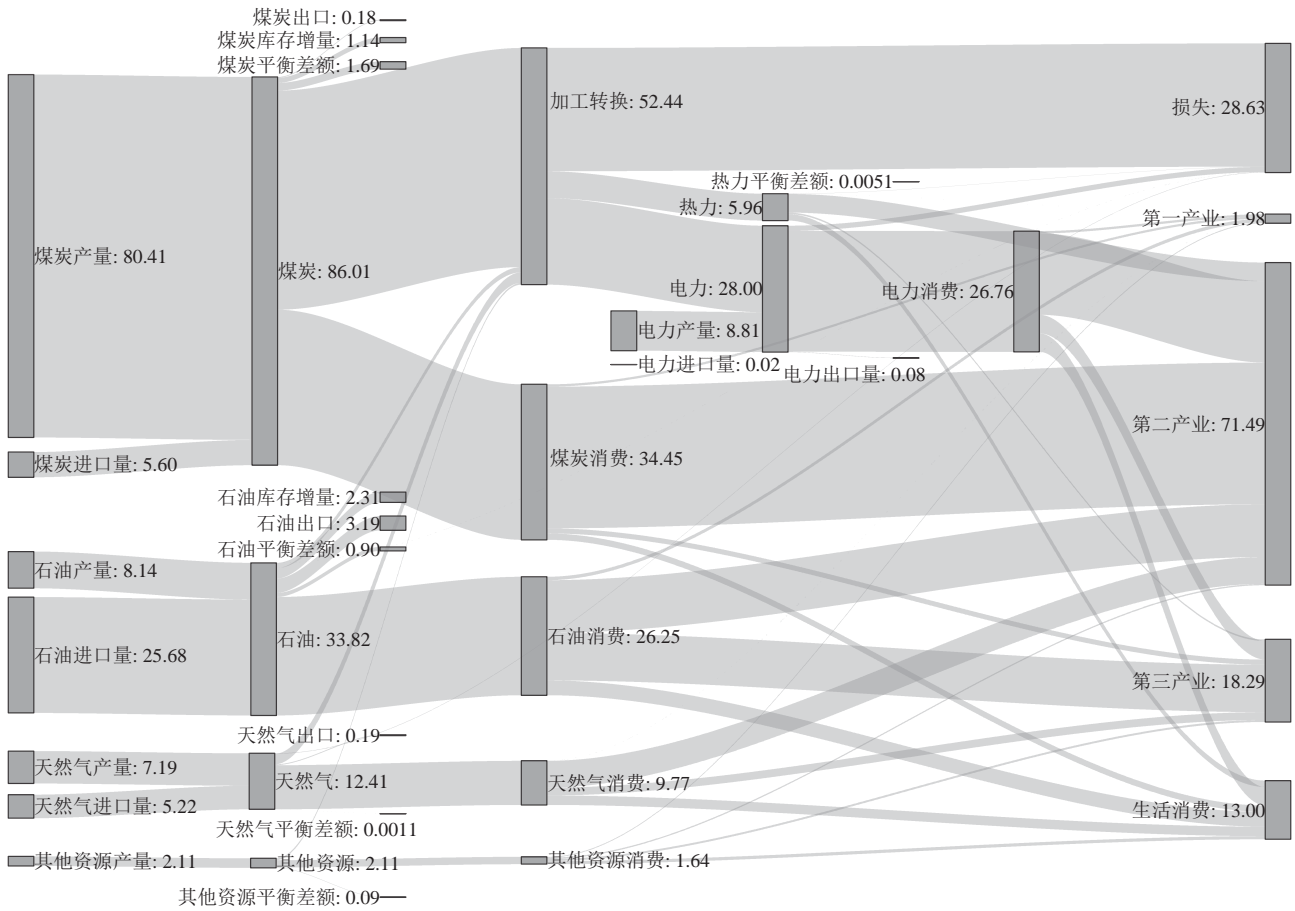


图3 2020年中国能源系统能流图 (单位: EJ)

Fig. 3 China's energy flow chart in 2020

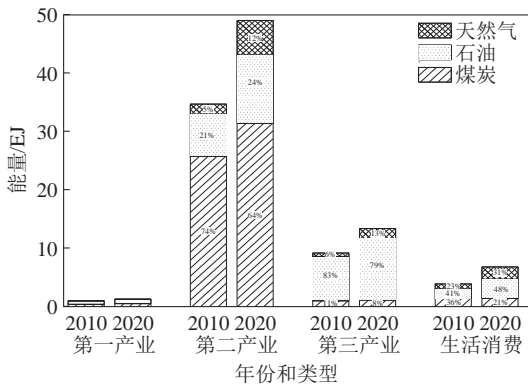


图4 2010年和2020年中国各行业能源消费及门类消费占比

Fig. 4 The proportion of energy consumption and category consumption in China in 2010 and 2020

增长 114% 和 459%。2020 年中国清洁供热面积 116 亿平方米, 清洁供热率达 55%, 天然气占比达到了 30%。

2.1.3 能源效率分析

节能是实现能源系统可持续发展的关键途径, 能源效率就是节能工作的重要评价指标。而能源效率有不同的表述。从能流图可以发现, 中国能

源物理效率正处于稳步提升阶段。终端能源效率描述能源终端消费量与所供消费的能源总量的比值, 2010 年和 2020 年中国终端能源效率分别为 74.52% 和 79.04%, 实现了能流在不同产品和产业的结构优化。类似地, 能源加工转换效率刻画能源经过加工和转化产出的各种能源产品的数量与投入加工转换的各种能源数量的比值。2010 年和 2020 年中国能源系统能源加工转化的效率为 72.5% 和 73.7%。能源系统的总效率则是中间环节效率与终端利用效率的乘积^[21]。其中, 能源的中间环节效率描述了能源在加工、转换和贮运的物理效率, 而终端利用效率定义为农业、工业、交通运输、建筑能源消费量占终端能源消费量比重与各自的能源效率的乘积相加之和。由此得出 2010 年和 2020 年中国能源系统的能源效率分别为 36.0% 和 39.3%。

此外, 不同于能源系统的物理效率, 能耗强度经常将能源和经济相结合的视角, 来表征整个

能源经济系统的能效^[22]。结合国家统计局年鉴，2010年和2020年中国单位GDP能耗分别0.88 tce/万元和0.61 tce/万元（tce通常代表“吨标准煤当量”（tonne of coal equivalent）的缩写。它是一个能源单位，用于比较不同能源形式的能量输出），实现了较大的下降，能源效率进一步提升，但与发达国家相比仍有较大差距，中国的单位GDP能耗仍是世界平均水平的1.5倍。

2.2 中国能源系统焓流的演变及分析

2.2.1 焓流整体分析

图5和6展示了2010年至2020年中国能源系统焓流的演变。在焓的总输入和最终消费输出方面，2010年和2020年中国能源系统焓输入分别为98.02 EJ和140.16 EJ，焓消费分别为13.81 EJ和24.19 EJ，与能流的增长一致，焓流也呈现了明显

的上涨趋势，特别是风电和光伏的焓流获得了较大的增长。基于国家近年来对新能源的大力支持，截至2022年底，中国可再生能源装机突破12亿kW，达到12.13亿kW，其装机已占全国发电总装机的47.3%。但在能源效率方面，中国能源系统的焓效率却远低于能量效率，2010年至2020年中国能源系统的焓效率从17.44%增长到23.91%。究其原因，能源效率计算时仅考虑了因绝热而导致的外界传热不可逆损失，因此认为煤炭、石油和天然气的燃烧过程和传热过程的能量效率几乎接近100%，而焓效率则是同时考虑了能源转化过程的内部不可逆损失和外部不可逆损失，这些损失包括化学能变换、热转热、热转电、电转热、电转冷等设备高品质能源转为低品质能源的不可逆损失。

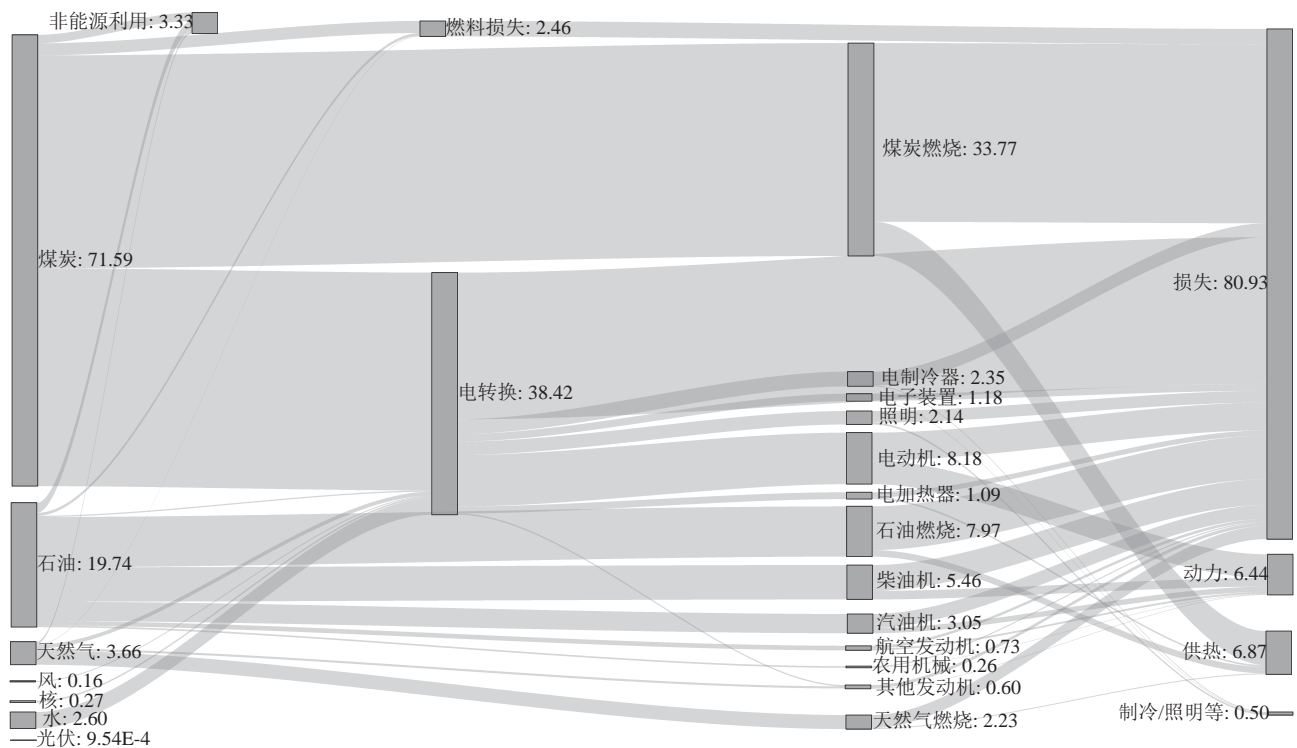


图5 2010年中国能源系统焓流图（单位：EJ）

Fig. 5 China's exergy system flow chart in 2010

2.2.2 终端设备焓利用

从终端用能的焓形式上看，相比于2010年中国能源系统的动力焓消费、热力焓消费以及其他焓消费分别占比46.64%、49.74%和3.62%，2020年的占比则分别变化为55.52%、39.76%、4.72%。从焓流视角上看，源于产业结构调整和优化以及电气化进

程的推进，2020年动力焓消费的占比超过了热力焓消费的占比。即能源系统输入焓流在终端设备进行转换后中，更多的焓流在具有较高焓效率的终端用能设备中转换为机械能或者电能，这类设备包括电动机、柴油机、汽油机、航空发动机等设备。

如图7所示，不难发现，终端用能设备焓效率

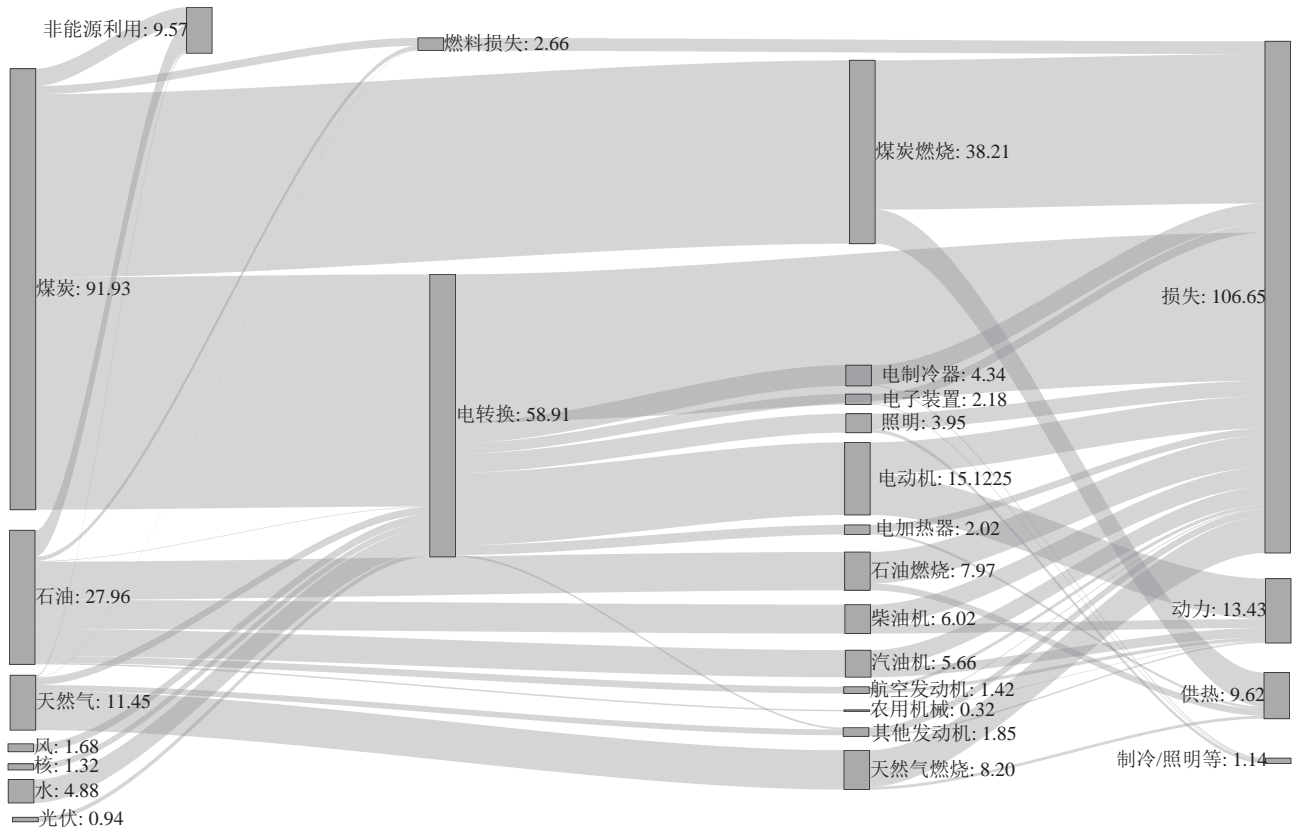


图 6 2020年中国能源系统烟流图 (单位: EJ)
 Fig. 6 China's exergy system flow chart in 2020

的大小直接关系能源系统烟效率的高低, 本文将终端用能设备分为直接燃烧类用能设备、电气类用能设备、内燃动力类用能设备。其中, 就直接燃烧类设备而言, 以煤炭为例, 2010年中国能源系统煤炭燃烧产生的烟占到终端消费烟的39.13%, 其值在2020年则降低到29.38%; 2010年用于中国能源系统电力消费的烟占到终端消费烟的16.42%, 其值在2020年则增加到21.85%。总体上, 与能流分布类似, 目前中国煤炭提供的有用烟占比稳步下降, 但煤炭提供的有用烟仍占中国能源系统总

有用烟的较高比例。在电气类用能设备中, 源于电气化进程的加快和电动机行业整体能效水平的提高, 电动机贡献的有用烟占比从2010年的27.24%增长到了34.88%。需要注意的是, 以电制冷器为代表的电气化设备, 其提供的有用烟仅占终端有用烟总量的2%。原因在于, 如表2所示, 相对于其他设备高达99%的品质因子, 电制冷器的品质因子仅为6%, 因此在同等能量数量下, 其对应的烟转换效率较其他设备低。就内燃动力类设备而言, 源于近年来交通运输业的规模发展, 汽油机

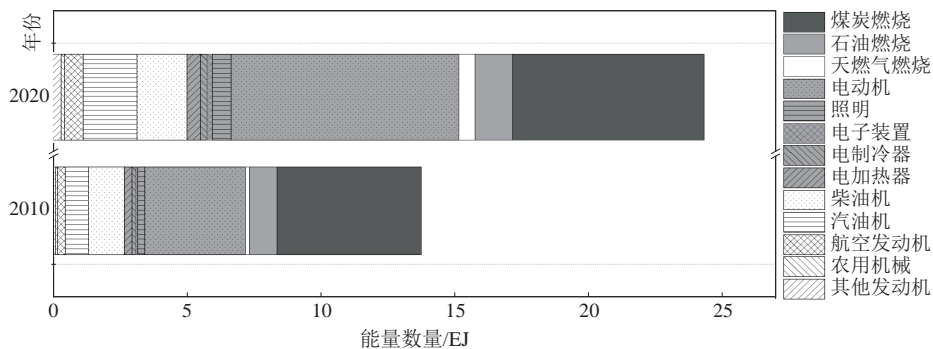


图 7 终端有用烟各转换装置提供量
 Fig. 7 The terminal exergy provided by each conversion device

2010年提供的有用焓占比为6.19%，2020年则增加到了8.22%；柴油机2010年提供的有用焓占比7.64%，2020年增加到了9.88%。

2.2.3 焓损失情况

从整个焓流图来看，目前中国能源系统终端转换阶段的平均焓效率分别为14.58%和18.49%，远低于其对应的能源加工转化的效率（2010年和2020年中国能源系统能源加工转化的效率为72.5%和73.7%），原因包括电转化、柴油、汽油内燃设备以及发电、供热的能源利用过程产生了较大的焓损失。因此，在电、热转换方面，以2020年为例，中国能源系统电力和热力生产部门的平均焓利用效率分别为47.53%和16.74%。图8给出了

2010年至2020年国能源系统终端用能过程焓损失来源、体量和占比。源于能源消费体量的增长，中国能源系统焓损失的绝对值也不断扩大，2020年较2010年增长了31.78%。其中，煤炭燃烧在总焓损失的占比处于首位，2020年煤炭燃烧损失的占比达到29.42%。石油燃烧损失的焓在总焓损失中的占比由2010年8.57%下降为2020年6.22%。天然气燃烧的焓损失占比则呈现上升趋势，且其损失占比由2010年的2.56%上升为2020年的7.19%。另外，电转换焓损失占比逐年扩大且占比增加，2020年损失占比达到28.35%；电动机的焓损失占比也呈现出了上升的趋势，由2010年占比5.46%上升为2020年占比6.32%。

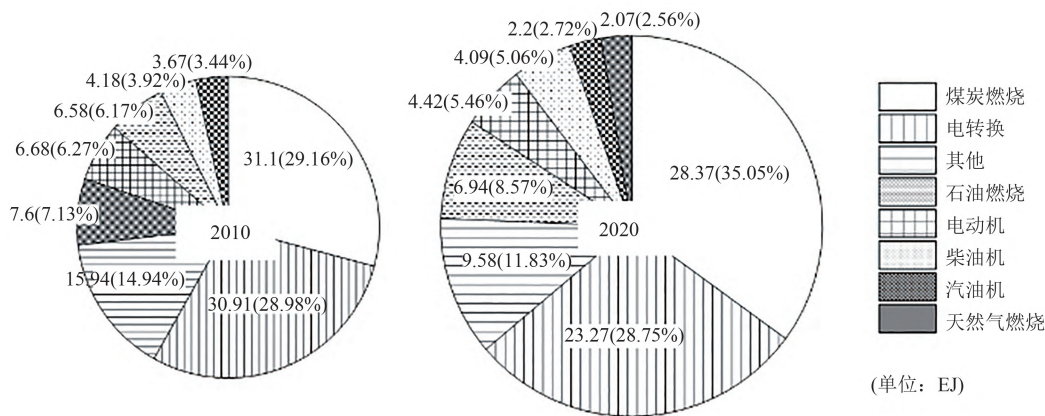


图8 2010—2020年终端焓损失情况
Fig. 8 2010—2020 terminal loss situation

3 基于能流和焓流视角的中国能源系统能效优化

能源系统的提质增效是全球可持续发展的永恒话题。近年来，中国能源系统的能流和焓流分布逐渐得以优化。基于热力学第二定律的焓流分析法能够发现能流分析方法难以揭示的不同能源在能量各链条下的损失或者不匹配性，有助于深度挖掘中国能源系统走向碳达峰和碳中和的节能潜力。就此，本文做以下建议：

3.1 深化化石燃料以及高品质能源的梯级利用

从热力学第二定律来看，热力学第一定律视角下具有较高燃烧效率、传热效率或者热效率的设备或者过程，其涉及的燃烧、传热、余热等过程的内部不可逆损失较大，设备转换的焓效率较

低。比如本文得出2020年中国化石能源燃烧过程焓损失占比达到了45.69%、电转换过程焓损失占比28.75%。因此，化石能源燃烧、余热回收等过程的提质增效是双碳目标下的中国能源系统节能的关键。能源系统及其关键技术的顶层设计和布局，应在能源守恒定律的基础上，根据总能系统能量梯级利用的理念，一方面加强煤、石油、天然气以及生物质的梯级综合利用技术研发、挖掘化石燃料燃烧过程化学能的高效转化、利用与回收^[23-24]，关注化学能转换、热功转换、温差和热回收等技术的余热余压利用技术，并实现中低品位能源的回收再利用；另一方面，应从焓的角度合理设计能源系统，避免高品质化石能源在能源转化和消费过程的能源的低品质利用，加强各类工

业园区以及综合体的异质多能流的耦合设计^[25-26], 优化电能替代过程各技术路线的发展, 完善匹配冷、热特征的供冷、供热新技术。

3.2 准确辨识再电气化过程的终端适配应用场景

以可再生能源为主体的新型电力系统的发展, 是中国双碳目标实现的重要抓手。预计到 2030 年, 中国非化石能源消费比重达到 25% 左右。风、光、水等非化石能源的主要转化方式是电力转换。因此, 在热力学第二定律的烟视角, 包括风、光等可再生能源发电、煤电、气电和核电在内的电力能源, 其品质系数等同于机械能的高品质能源载体, 或将有助于提高能源系统烟效率。根据能源系统“品质对口”的基本原则, 高品质能源应该用于高品质需求, 低品质能源应应用与低品质需求, 在分配得当、各的其所的基础上实现温度对口、梯级利用。因此, 一方面, 可再生能源以及化石能源电力应直接用于电动机而产生机械能, 是未来电气化的重要场景; 另一方面, 将高品质的电力通过电压压缩式制冷、热泵以及电锅炉等设备转变为终端的供热、供暖或者蒸汽需求, 如不考虑其经济成本的比较优势, 在烟的视角上是不合理的。比如电热锅炉或者电热泵, 尽管其热效率几乎接近 100% 甚至其 COP 大于 1, 但是设备转换的烟效率却低至 25%。因此, 在能源资源有限、度电成本较高以及环境排放惩罚的约束下, 应进一步从能效、经济和排放的维度对能源系统的电气化场景进行科学的设计^[27-28]。

3.3 构建多能互补、信息物理融合的能源共享网络

中国的能源资源的分布总体呈现逆向分布的特征, 且随着风光等可再生能源的快速发展, 能源系统将供给侧和需求侧的双重不确定性将凸显。2023 年年底, 全国可再生能源发电装机规模达 14.5 亿千瓦, 占全国发电总装机的比例超过 50%, 历史性超过火电装机。但风光可再生能源的利用小时数低, 2023 年可再生能源发电量(含水电)仅约占中国全社会用电量量的 33% 左右(风光占比仅约 17% 左右)。因此, 随着风光装机的不断提升, 能源系统的发展必将呈现多能互补、互联互

济的多元化、网络化趋势^[29-30]。风光的不确定性也带来传统管控技术的迭代, 能源系统与信息通信技术和控制技术为代表数字化技术将深度融合, 形成信息与物理高度融合的能源共享网络, 将是支撑能源清洁低碳转型、双碳目标实践的重要抓手。烟视域下, 能源共享网络体现着信息流赋能能量流的熵增与熵减的基本理念, 能源共享网络底层多能互补综合能源系统与顶层数字孪生能源物联网的交叉融合, 可充分激发能源共享网络的自组织性, 以实现能量系统的有序化^[27, 29]。因此, 能源共享网络的发展也将是能源系统能流与烟流流动特征的具体表现, 其遵循的能的梯级利用、能的因地制宜、能的多能互补以及能的互联互通的基本理念, 将极大优化能源系统的开发、转换、存储与消费的结构, 以及加强不同能源部门的跨界交流, 实现最大化的节能。

3.4 统筹物理效率、经济效益和环境效益协同发展

物理效率仅仅是体现能源系统服务的能效的一个维度, 其对经济、环境等发展态势的指向也存在局限, 即能源除了在“数量”、“品质”等属性外, 也具有“经济”和“环境”的属性, 更具有“安全”的底线需求^[31-32]。近年来, 尽管中国能源系统的能耗总量不断增大, 并成为世界第一大能源消费国, 但得益于能效提升、产业结构调整和对环境问题的重视, 中国单位 GDP 能耗和人均能源排放逐年降低, 2020 年单位 GDP 能耗降低到 0.49 万吨标准煤/亿元, 较 2010 年降低 45.27%^[28]。安全高效、清洁低碳, 已成为中国现代能源体系的核心内涵, 也是对能源系统如何实现现代化的总体要求。因此, 在碳中和的全球共识下, 如何在“安全”的前提下构建能源系统的能效、经济、环境等多维综合评价体系以及能源价格体系^[19, 32], 研究能源物理效率与经济效率及环境效益耦合特性, 准确计量能源的各类属性及清单, 研判实现碳中和的能源供应和消费的组合优化, 实现能源系统可持续发展的全面客观评价, 提高能源系统的完善度将成为一个重要研究趋势^[33-36]。

4 结论

能源具有能量和品质的双重属性，能源系统能流和焓流的刻画对研究能源结构转型和节能减排计划的实施具有重要意义。本文从宏观角度刻画了中国能源系统在“数量”和“质量”上的流动特征，并分析了能源系统的转换效率和损失环节，所得的主要结论如下：

1) 能流视角看，近年来中国能源系统的物理效率稳步提升，2010年和2020年中国终端能源效率分别为74.52%和79.04%，同时能源结构向绿色低碳转型，能源效率呈现了较好的发展态势；在以煤为主的能源消费结构下，推动第二产业向第三产业结构转型、电气化率提升、先进节能技术的普及，将是未来节能减排的关键路径。热能在终端用能的占比仍高达73%，热能的清洁替代、绿色替代将是能源转型的一个重点。

2) 焓流角度看，近年来中国能源系统终端设备和电热转换过程焓损失较大，2010年和2020年中国能源系统的焓效率分别为17.44%和23.91%，所采用得焓流分析揭示了能源系统高品质电能的低质利用、热能的不匹配利用、能源燃烧过程的不可逆损失等等，这将是未来中国能源系统在深水节能的主要场景。

3) 双碳目标下中国能源效率将从能流视角走向焓流视角，但不能唯能效。能源系统的可持续转型要站在能源安全的前提下，一是深化化石燃料以及高品质能源的梯级利用，二是准确辨识再电气化过程的终端适配应用场景，三是构建多能互补、信息物理融合的能源共享网络，四是统筹物理效率、经济效益和环境效益协同发展。

本文仍存在以下不足：1) 因地热能利用和生物质能利用相对占比很小，故本文在计算过程中未将其列入；2) 本文计算过程中将可再生能源发电的焓品质系统设置为1，但是该假设仍值得进一步讨论；3) 焓流计算过程涉及各终端设备占比、焓效率的假设等，但由于产业的迭代升级，相关数据需要进一步探讨，比如表2。

本文同时绘制了2010到2020年中国能源系统

每年的能流、焓流及碳流图，欢迎交流探讨！

参考文献

- [1] 邹才能,熊波,薛华庆,等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发,2021,48(2):411-420.
ZOU Caineng, XIONG Bo, XUE Huaqing, et al. The role of new energy in carbon neutral[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2):411-420.
- [2] 中国国际发展知识中心. 全球发展报告[R]. 北京: 中国国际发展知识中心, 2022.
Center for International Knowledge on Development, China. Global development report[R]. Beijing, China: Center for International Knowledge on Development, China, 2022.
- [3] 别朝红,王则凯,肖遥,等. 双碳目标下新型电力系统发展展望[J]. 新型电力系统, 2023, 1(2):116-131.
BIE Zhaohong, WANG Zekai, XIAO Yao, et al. Outlook on the development of new power system under dual-carbon target[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(2): 116-131.
- [4] 刘吉臻,王庆华,胡阳,等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1):49-65.
LIU Jizhen, WANG Qinghua, HU Yang, et al. Connotation, characteristics and key technologies of new power systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 49-65.
- [5] CULLEN M J, ALLWOOD M J. The efficient use of energy: tracing the global flow of energy from fuel to service[J]. Energy Policy, 2010, 38(1):75-81.
- [6] SUBRAMANYAM V, PARAMSHIVAN D, KUMAR A, et al. Using Sankey diagrams to map energy flow from primary fuel to end use[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 91:342-352.
- [7] SOUNDARARAJAN K, HO H K, SU B. Sankey diagram framework for energy and exergy flows[J]. Applied Energy, 2014, 136:1035-1042.
- [8] BIONDI A, SCIUBBA E. Extended exergy analysis (EEA) of Italy, 2013-2017[J]. Energies, 2021, 14(10): 2767.
- [9] 李政,付峰,麻林巍,等. 基于能源平衡表的中国能流图[J]. 中国能源, 2006, 28(9):5-10, 18.
LI Zheng, FU Feng, MA Linwei, et al. China's energy flow chart based on energy balance sheet[J]. Energy of China, 2006, 28(9):5-10, 18.
- [10] 廖华,魏一鸣. 2008年中国能源流分析[J]. 中国能源, 2010, 32(9):17-18, 46.
LIAO Hua, WEI Yiming. The analysis of China's energy flow in 2008[J]. Energy of China, 2010, 32(9):

- 17-18,46.
- [11] 孙文文,何国庆. 基于能流图和碳流图的中国能源结构转型分析及展望[J]. 分布式能源,2022,7(4):10-17.
SUN Wenwen, HE Guoqing. Analysis and prospect of China's energy structure transformation based on energy flow chart and carbon flow chart[J]. Distributed Energy, 2022,7(4):10-17.
- [12] 李嘉宇,彭雪婷,贾国伟,等. 2019年中国能源流和碳流分析[J]. 煤炭经济研究,2022,42(6):18-26.
LI Jiayu, PENG Xueting, JIA Guowei, et al. Analysis of China's energy flow and carbon flow in 2019[J]. Coal Economic Research,2022,42(6):18-26.
- [13] 付佳鑫,刘颖琦. 中国能源低碳发展研究:北京案例[J]. 宏观经济研究,2020(10):164-175.
FU Jiaxin, LIU Yingqi. A study on China's low-carbon energy development: a case study of Beijing[J]. Macroeconomics,2020(10):164-175.
- [14] 董东林,张一艳,林刚. 基于能流图的山东省能源平衡分析及能源需求预测[J]. 煤炭经济研究,2020,40(2):31-38.
DONG Donglin, ZHANG Yiyang, LIN Gang. Analysis of energy balance and energy demand forecast in Shandong Province based on energy flow chart[J]. Coal Economic Research,2020,40(2):31-38.
- [15] MA L W, FU F, LI Z, et al. Oil development in China: current status and future trends[J]. Energy Policy, 2012, 45:43-53.
- [16] YU F F, MA L W, JIANG L X, et al. Mapping the energy flows of coal utilization in China: the methodology and case studies for the year 2005 and 2010[J]. Advanced Materials Research, 2013, 724-725: 1234-1241.
- [17] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴-2011[M]. 北京:中国统计出版社,2011.
Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China energy statistics yearbook 2011[M]. Beijing, China: China Statistics Press, 2011.
- [18] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴-2021[M]. 北京:中国统计出版社,2022.
Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook 2021[M]. Beijing, China: China Statistics Press, 2022.
- [19] WANG Y Z, ZHANG L L, SONG Y, et al. State-of-the-art review on evaluation indicators of integrated intelligent energy from different perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 113835.
- [20] LIN Y C, CHONG C, MA L W, et al. Analysis of changes in the aggregate exergy efficiency of China's energy system from 2005 to 2015[J]. Energies, 2021, 14(8):2304.
- [21] 王庆一. 2015 中国能源效率评析[J]. 中国能源, 2017, 39(6):43-47,42.
WANG Qingyi. China's energy efficiency evaluation in 2015[J]. Energy of China, 2017, 39(6):43-47, 42.
- [22] 王庆一. 中国 2007 年终端能源消费和能源效率(中)[J]. 节能与环保, 2009(3):16-19.
WANG Qingyi. China end use energy consumption and energy efficiency in 2007(2)[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2009(3):16-19.
- [23] LI J X, WANG D, JIA H J, et al. Mechanism analysis and unified calculation model of exergy flow distribution in regional integrated energy system[J]. Applied Energy, 2022, 324:119725.
- [24] WANG Y Z, ZHAO J, CHEN G B, et al. A new understanding on thermal efficiency of organic Rankine cycle: cycle separation based on working fluids properties[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 157: 169-175.
- [25] 周伟,孙永辉,谢东亮,等. 计及改进阶梯型碳交易和热电联产机组灵活输出的园区综合能源系统低碳调度[J]. 电网技术, 2024, 48(1):61-69.
ZHOU Wei, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Low-carbon dispatch of park-level integrated energy system considering improved ladder-type carbon trading and flexible output of combined heat and power unit[J]. Power System Technology, 2024, 48(1):61-69.
- [26] 韩俊涛,韩恺,王永真,等. 低碳分布式综合能源系统的能值、经济和环境优化评价[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11):1089-1098.
HAN Juntao, HAN Kai, WANG Yongzhen, et al. Energy, economic and environmental optimization evaluation of low carbon distributed integrated energy system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11):1089-1098.
- [27] 王永真,张宁,关永刚,等. 当前能源互联网与智能电网研究选题的继承与拓展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4):1-7.
WANG Yongzhen, ZHANG Ning, GUAN Yonggang, et al. Inheritance and expansion analysis of research topics between energy internet and smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4):1-7.
- [28] 王丹,周天烁,李家熙,等. 面向能源转型的高烟综合能源系统理论与应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17):114-131.
WANG Dan, ZHOU Tianshuo, LI Jiayi, et al. Theory and application of high-exergy integrated energy system for energy transition[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2022, 46(17): 114-131.
- [29] 王永真, 康利改, 张靖, 等. 综合能源系统的发展历史、典型形态及未来趋势[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 84-95.
WANG Yongzhen, KANG Ligai, ZHANG Jing, et al. Development history, typical form and future trend of integrated energy system[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(8): 84-95.
- [30] 康重庆, 钟海旺. 能源互联网主动支撑新能源供给消纳体系[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2): 113-115.
KANG Chongqing, ZHONG Haiwang. Energy internet actively supports the supply and consumption system of renewable energy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 113-115.
- [31] 唐葆君, 吴 邴, 王崇州, 等. 省级能源高质量发展指数研究(2012-2022年)[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2023, 25(2): 17-23.
TANG Baojun, WU Yun, WANG Chongzhou, et al. High-quality energy development index in 31 provinces (2012-2022) [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2023, 25(2): 17-23.
- [32] 范 英, 衣博文. 能源转型的规律、驱动机制与中国路径[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 95-104.
FAN Ying, YI Bowen. Evolution, driving mechanism, and pathway of China's energy transition[J]. Journal of Management World, 2021, 37(8): 95-104.
- [33] 王永真, 潘崇超, 韩 恺, 等. “双碳”目标下中国综合能源服务的态势辨析与理论架构[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(4): 379-389.
WANG Yongzhen, PAN Chongchao, HAN Kai, et al. Situation identification and theory architecture of integrated energy services under dual carbon goal in China [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(4): 379-389.
- [34] BROCKWAY P E, STEINBERGER J K, BARRETT J R, et al. Understanding China's past and future energy demand: an exergy efficiency and decomposition analysis [J]. Applied Energy, 2015, 155: 892-903.
- [35] WANG Y, HAN Y, SHEN J, et al. Data center integrated energy system for sustainability: Generalization, approaches, methods, techniques, and future perspectives [J]. The Innovation Energy, 2024: 1(1), 100014.
- [36] CHONG C H, GAO Y, MA L W, et al. A supply chain allocation method for environmental responsibility based on fossil energy as the anchor for carbon responsibility[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 416: 137904.

修回日期: 2024-03-20。

收稿日期: 2023-11-22。

作者简介:



王永真

1988-, 男, 博士, 副教授, 博导
主要研究方向为综合智慧能源及其热力循环
E-mail: wyz80hou@bit.edu.cn



韩 恺(通信作者)

1978-, 男, 博士, 教授, 博导
主要研究方向为新能源动力系统建模与控制, 燃料电池和综合智慧能源
E-mail: autosim@bit.edu.cn

(责任编辑 胡琳琳, 陈 蔓)