



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Clean Energy—Article

基于碳排放达峰约束的 2030 年中国能源供需模型及实证研究

陈进行

China Datang Corporation, Beijing 100033, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 April 2017

Revised 11 July 2017

Accepted 12 July 2017

Available online 15 August 2017

关键词

碳排放

达峰

能源供需

模型

情景

摘要

综合考虑经济发展、技术进步、政策目标、资源禀赋、环境容量等方面因素，设计了中国能源供需模型，构建了碳排放提前达峰和既定达峰两种情景。应用模型对两种情景下的能源供需和碳排放进行了分析，结果显示：2030年前一次能源和电力需求将持续增长，电力需求增速将显著快于一次能源需求；低碳化是能源供需结构变化的基本特征，2030年前非化石能源将超过石油成为第二大能源；选择能效更高的能源消费模式和更加低碳的能源供应方式，能源消费产生的碳排放可能在2025年左右提前达峰；电源结构的低碳化是碳排放尽早达峰、降低峰值的关键因素。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

在第21届联合国气候变化大会上，所有缔约方一致通过《巴黎协定》，提出将全球平均气温升高控制在2℃之内，并努力控制在1.5℃之内，中国政府提出将于2030年左右使CO₂排放总量达到峰值并争取尽早实现。由于CO₂排放主要来自于化石能源消费，因此，CO₂排放总量作为新的硬约束将对当前至2030年的中国能源供需总量、增速、结构等方面产生重大影响，量化分析这些影响对于研究制定中长期能源发展规划与政策具有重要的理论和现实意义。

已有碳排放达峰研究主要集中在碳排放增长动力、达峰时间与峰值水平、地区与行业达峰路径等方面。王锋等[1]指出国内生产总值（GDP）增长是中国碳排放

量增长的最大驱动因素，柴麒敏[2]进一步提出工业化是碳排放峰值能否提前的首要因素。渠慎宁和郭朝先[3]、姜克隽等[4]、马丁和陈文颖[5]的研究显示，若经济社会发展采用节能、低碳模式，能源活动产生的CO₂排放可以在2030年左右达峰，最早可能在2025年之前实现排放峰值。杨秀等[6]、刘晴川等[7]分别预测了北京、重庆等地的碳排放峰值，程路和邢璐[8]、郭士伊[9]研究了电力、工业领域碳排放达峰的实现路径。

总的来看，尽管已有的研究在阐述达峰影响、实现路径时突出了能源行业的作用，但关注点多是一次能源消费总量，缺乏针对一次能源供应结构、终端能源消费结构、发电量和电源结构、能源加工转换等其他重大问题的系统整体优化分析，难以回答不同达峰情景下的能源供需结构，碳流向、流量等重要问题。基于此，本文

E-mail address: chenjinhang@china-cdt.com

2095-8099/© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: Engineering 2017, 3(4): 512–517

引用本文: Jinhang Chen. An Empirical Study on China's Energy Supply-and-Demand Model Considering Carbon Emission Peak Constraints in 2030. Engineering, <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.019>

试图从“能源-经济-环境”(3E)系统仿真的视角,构建考虑碳排放达峰等约束的中国能源供需模型,对不同达峰情景下的能源供需总量、增速、结构及详细的碳排放情况进行分析。

2. 模型

本文借鉴MARKAL/TIMES、NEMS、MAED、AIM、LEAP等经典模型[10-14]的研究方法,采用“能源-经济-环境”(3E)系统“自下而上”与“自上而下”相结合的建模思路,综合考虑经济发展、技术进步、政策目标、资源禀赋、环境容量等方面因素,设计了中国能源供需模型,其模型框架如图1所示。

模型计算分为两个阶段:第一阶段,对经济社会发展和技术进步进行情景设计,估算GDP、人口、城市化率等经济社会发展基本参数,进而应用计量经济、弹性系数等方法预测居民生活和各行业部门(如建筑、交通、商业、其他部门)的能源服务需求;接下来,应用产值单耗法、产品单耗法、周转分析法等得到分部门终端能源需求,在此基础上,应用时间序列、能源比价等方法预测燃料结构,进而得到终端分部门、分品种能源需求,品种包括煤炭、石油、天然气、电力、热力和其他能源。第二阶段,考虑发电、供热、炼油、炼焦、制气等加工

转换环节,以碳排放总量达峰为主要约束,同时兼顾能源供需平衡及考虑能源资源、加工转换能力、非化石能源占比等约束(平衡),通过能源系统仿真计算得到一次能源供应总量和结构;基于各种一次能源、终端能源在供应侧各环节和需求侧各部门的投入产出关系及相关的物理能源效率、IPCC碳排放因子,计算得到能源活动产生的CO₂。

第二阶段能源系统仿真所涉及的主要约束(平衡)如下。

(1) 碳排放总量达峰约束:

$$Ca_t \leq Ca_T \quad (1)$$

式中, t 为规划期年份($t=1, \dots, 15$ 分别表示2016年, $\dots, 2030$ 年); T 为规划期达峰年份; Ca_t 为第 t 年能源活动产生的CO₂。

$$Ca_t = \sum_{i=1}^3 ((EP_{it} + IM_{it} - EM_{it}) \times RLO_{it} + (EP_{it} + IM_{it} - EM_{it}) \times (1 - RLO_{it}) \times RTP_{it} + TG_{it} \times EG_{it} + TH_{it} \times EH_{it}) + FD_{it} \times Emi_i \quad (2)$$

式中, i 为化石能源种类($i=1, 2, 3$ 分别表示煤炭、石油和天然气); EP_{it} 、 IM_{it} 、 EM_{it} 、 RLO_{it} 、 RTP_{it} 和 FD_{it} 分别为第 t 年第 i 种化石能源的产量、进口量、出口量、输储(transport and storage)损失率、加工转化损失率和终端

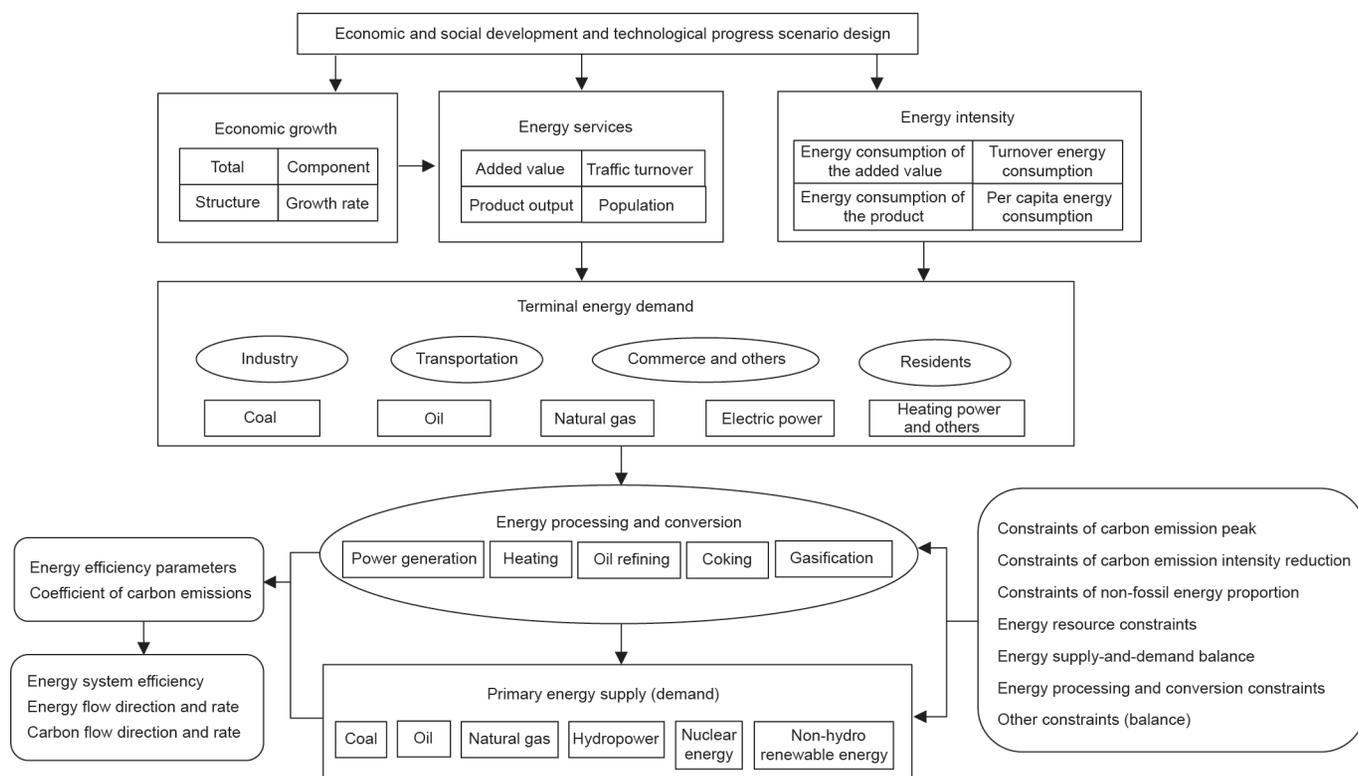


图1. 中国能源供需模型框架。

消费量; TG_{it} 、 TH_{it} 分别为第 t 年以第 i 种化石能源为投入的发电量、供热量; EG_{it} 、 EH_{it} 分别为相应的发电效率和供热效率; Emi_i 为第 i 种化石能源的 CO_2 排放系数。

(2) 煤炭供需平衡, 即:

$$(EP_{1t} + IM_{1t} - EM_{1t}) \times (1 - RLO_{1t}) \times (1 - RTP_{1t}) - TG_{1t} \times EG_{1t} - TH_{1t} \times EH_{1t} \geq FD_{1t} \quad (3)$$

式中, RLO_{1t} 、 RTP_{1t} 分别为煤炭输储损失率、加工转化(包括洗选、炼焦及其他)损失率。

(3) 石油供需平衡, 即:

$$(EP_{2t} + IM_{2t} - EM_{2t}) \times (1 - RLO_{2t}) \times (1 - RTP_{2t}) - TG_{2t} \times EG_{2t} - TH_{2t} \times EH_{2t} \geq FD_{2t} \quad (4)$$

式中, RLO_{2t} 、 RTP_{2t} 分别为石油输储损失率、加工转化(炼油)损失率。

(4) 天然气供需平衡, 即:

$$(EP_{3t} + IM_{3t} - EM_{3t}) \times (1 - RLO_{3t}) \times (1 - RTP_{3t}) - TG_{3t} \times EG_{3t} - TH_{3t} \times EH_{3t} \geq FD_{3t} \quad (5)$$

式中, RLO_{3t} 、 RTP_{3t} 分别为天然气输储损失率、加工转化(天然气液化)损失率。

(5) 电力供需平衡, 即:

$$\left(\sum_{k=1}^{10} (TCP_{kt} + ACP_{kt} \times UF_{kt}) \times CF_{kt} \times (1 - RLO_{4t}) + IM_{4t} - EM_{4t} \right) \times (1 - RTP_{4t}) \geq FD_{4t} \quad (6)$$

式中, k 为电源种类 ($k = 1, \dots, 10$ 分别表示煤电、油电、气电、水电、核电、风电、太阳能发电、生物质发电、

地热发电、海洋能发电); TCP_{kt} 、 ACP_{kt} 、 UF_{kt} 、 CF_{kt} 分别为第 k 种电源在第 t 年的期初装机容量、新增装机容量、新增装机等效容量系数、平均设备利用小时数; RLO_{4t} 、 RTP_{4t} 、 IM_{4t} 、 EM_{4t} 、 FD_{4t} 分别为第 t 年的厂用电率、线损率、电力进口量、电力出口量、终端用电量。

3. 情景设计

根据中国政府的承诺, 即 CO_2 排放总量在2030年左右达到峰值并争取尽早达峰, 由于中国能源活动排放的 CO_2 约占 CO_2 排放总量的90%, 因此能源活动排放的 CO_2 也需在2030年左右达峰并尽早达峰。基于此, 本文设计了能源活动碳排放达峰可能出现的两种情景, 即提前达峰情景、既定达峰情景。其中, 提前达峰表示2025年达峰, 既定达峰表示2030年达峰。与既定达峰情景相比, 提前达峰情景意味着加快低碳转型, 经济发展方式转变较快, 产业结构调整步伐更快, 能源技术取得更大突破, 能源利用效率提升较大。有关两种情景在经济、社会、技术等方面的假设见表1。

4. 结果分析

4.1. 应用模型对两种情景进行量化分析

一次能源需求总量增速呈现“逐级递减”变化趋势, 能源消费与经济增长“解耦”的特征逐渐显现。提前达峰情景下, 2015—2030年GDP和人口将分别增长139.6%和4.0%, 城镇化率上升11.9%; 2015—2020年、2020—2025年、2025—2030年的一次能源需求增速分别为1.9%、1.1%和0.6%, 由于增速明显低于GDP增速,

表1 两种情景下的主要假设

Factors	Advanced peak scenario	Planned peak scenario
GDP	The average annual GDP growth rate will be 6.5%, 6.0%, and 5.5% for the periods of 2015–2020, 2020–2025, and 2025–2030, respectively	Same as the advanced peak scenario
Industrial structure	The ratio between primary, secondary, and tertiary industries will be 8:36:56 in 2020 and 6:29:65 in 2030. Major energy-intensive products will reach their peak around 2020	The proportion of the secondary industry in 2020 and 2030 will be respectively 0.25% and 1% higher than for the advanced peak scenario. The opposite is the case for the tertiary industry. Major energy-intensive products will reach their peak around 2025
Population	The population will be 1.41 billion in 2020 and 1.43 billion in 2030	Same as the advanced peak scenario
Urbanization rate	The urbanization rate will reach 60% in 2020 and 68% in 2030	Same as the advanced peak scenario
Energy technology progress	The average annual energy consumption of primary energy-intensive products, the general industrial and commercial output value, and the traffic turnover will decrease by 1%–3%	The energy consumption of primary energy-intensive products, the general industrial and commercial output value, and the traffic turnover will be 1%–3% higher than for the advanced peak scenario
Non-fossil energy development	The proportion of non-fossil energy consumption relative to primary energy consumption will be not less than 15.2% and 20.5% in 2020 and 2030, respectively	The proportion of non-fossil energy consumption relative to primary energy consumption will be not less than 15% and 20% in 2020 and 2030, respectively

三段时期的能源消费弹性系数分别为0.3、0.2和0.1；到2030年，一次能源需求总量将达到 5.15×10^9 tce，较2015年增加约1/4，人均用能为3.6 tce，较2015年增加0.5 tce。既定达峰情景下，2030年一次能源需求总量较提前达峰情景高出 3.3×10^8 tce，人均用能较提前达峰情景高出0.2 tce。两种情景下的一次能源需求总量和结构见图2和图3，提前达峰情景下的能源供需具体情况见图4。

4.2. 煤炭占一次能源消费总量的比重将降至50%以下
提前达峰情景下，受资源瓶颈和环境容量约束，煤炭需求将在“十三五”期间开始负增长，占一次能源消费的比重持续下降。2030年煤炭需求为 2.47×10^9 tce，占一次能源需求的比重将由2015年的63.7%降至48.0%。既定达峰情景下，2030年煤炭需求较提前达峰情景高出 2.4×10^8 tce，占一次能源需求的比重较提前达峰情景高出1.4%。

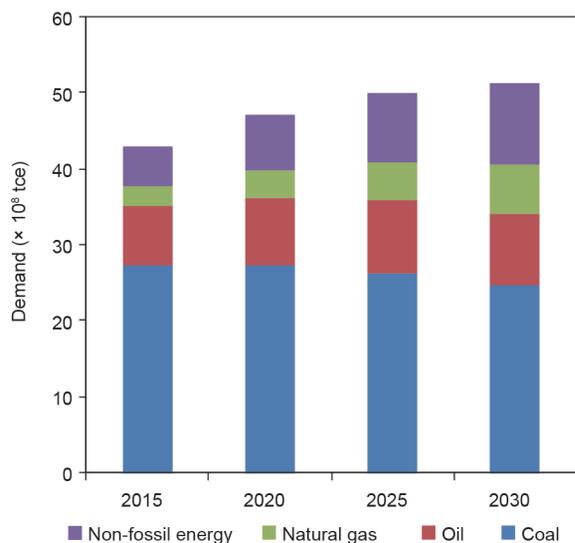


图2. 提前达峰情景下的一次能源需求。

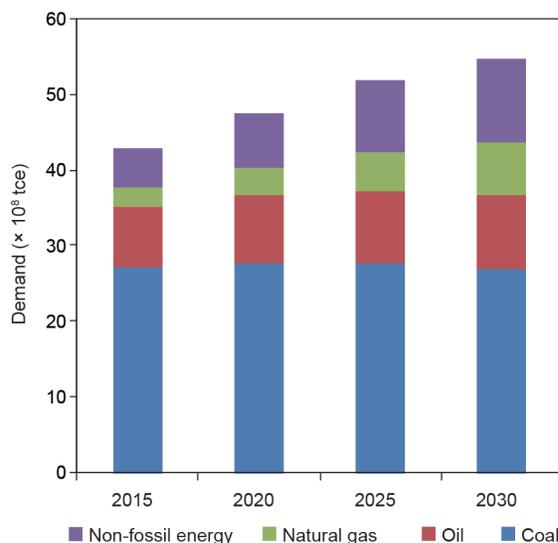


图3. 既定达峰情景下的一次能源需求。

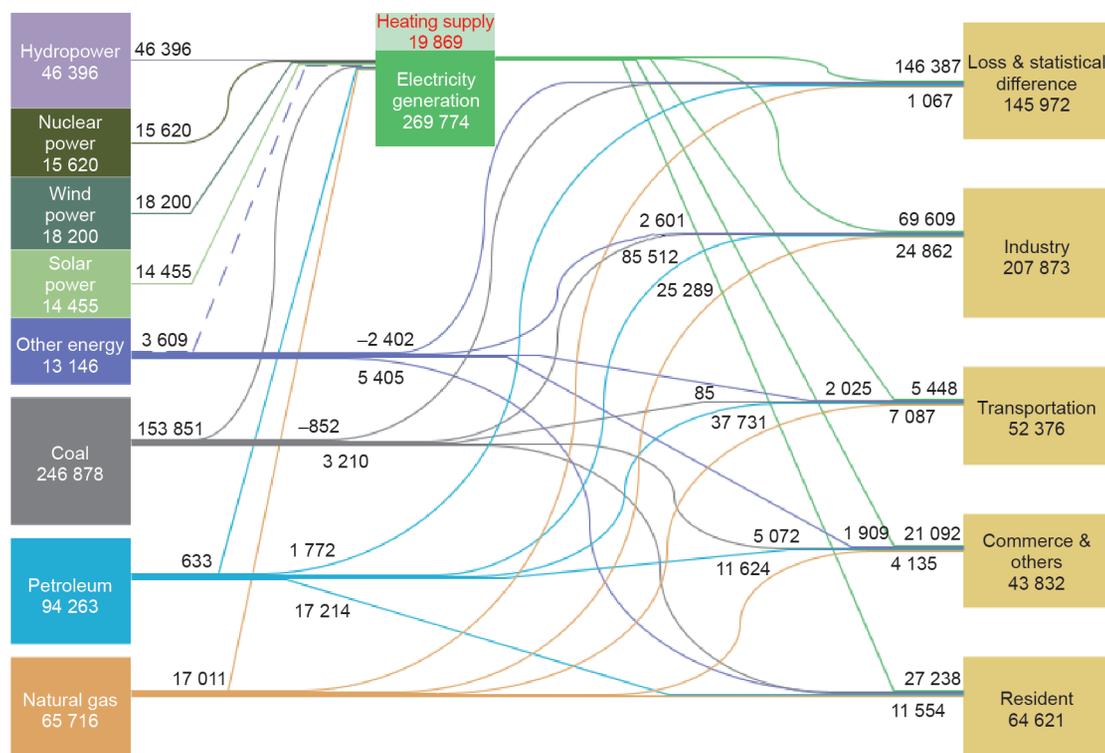


图4. 提前达峰情景下的2030年能流图。单位为 10^4 tce；水能、核能与其他非水可再生能源发电量按化石燃料替代法折算一次能源。发电能源消费含供热用能。损失含发电、供热、洗选煤、炼焦、炼油、制气、天然气液化等加工转换过程的净投入、回收能和能源输储损失。因四舍五入，分品种、分部门能源平衡可能存在微小差异。

4.3. 石油需求将逐渐趋近零增长

提前达峰情景下，受汽车消费增速放缓等因素影响，石油需求增速持续回落，特别是2020年后，随着电动汽车进入大规模商业化应用阶段，石油消费将趋于零增长，到2030年石油需求为 9.4×10^8 tce，较2015年增加 1.5×10^8 tce。既定达峰情景下，石油需求年均增速较提前达峰情景高出0.3%，2030年石油需求较提前达峰情景高出 4×10^7 tce。

4.4. 天然气需求将持续较快增长

提前达峰情景下，随着国产天然气生产能力、进口天然气管道输气能力、沿海液化天然气接收能力的提升，天然气供应能力显著增强，2015—2030年天然气需求年均增长6.6%，到2030年天然气需求总量将达 6.6×10^8 tce。既定达峰情景下，天然气需求增速较提前达峰情景略快，2030年天然气需求较提前达峰情景高出5%左右。

4.5. 非化石能源占比将超过石油成为第二大能源

提前达峰情景下，由于较大规模的水电新增装机投产、风电和光伏发电装机容量攀升、核电装机容量上升，非化石能源消费持续快速增长，但随着基数不断上升，增速将呈下降趋势，到2030年非化石能源需求量为 10.8×10^8 tce，占一次能源需求总量的比重达20.9%。

既定达峰情景下，非化石能源需求同样实现较快增长，2030年占一次能源需求的比重达到20.1%。

4.6. 电力需求增长超过50%，新增电力供应的50%以上来自非化石能源

提前达峰情景下，全社会电气化水平将持续提升，电能占终端能源消费的比重将由2015年的21.3%升至2030年的29.3%，全社会用电量年均增长3.2%，2030年达9200 TW·h，较2015年增加58.2%，增量的50%以上由非化石能源供应。既定达峰情景下，2015—2030年全社会用电量年均增速较提前达峰情景快0.4%，2030年用电量较提前达峰情景高出500 TW·h。

4.7. 碳排放增速持续下降，达峰时间和峰值取决于非化石能源增长速度

提前达峰情景下，随着水电、核电与非水可再生能源开发利用规模的快速增长，能源消费产生的CO₂增速将由2010—2015年期间的2.6%降至2015—2020年的0.8%，2020年之后进一步下降，2025年达到峰值 1.02×10^{10} t；到2030年，CO₂排放量将减至 1×10^{10} t，其中电力部门排放占比近一半，分部门、分品种排放情况见图5。既定达峰情景下，能源消费产生的CO₂将于2030年达峰，峰值较提前达峰情景高 5×10^8 t左右。

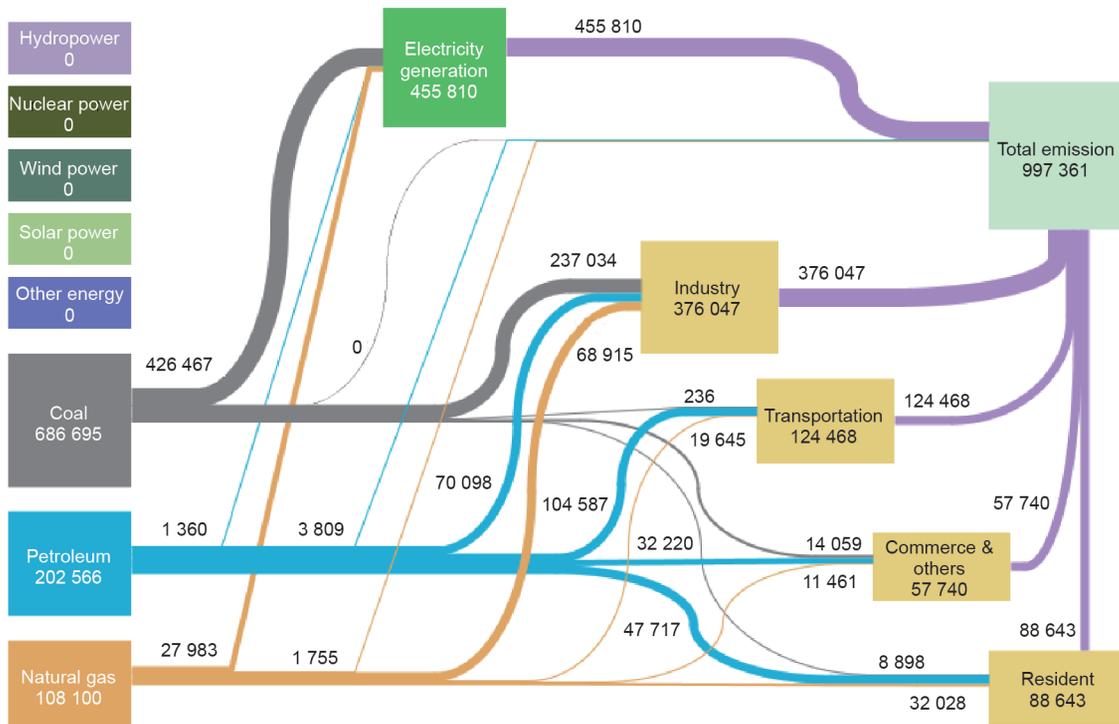


图5. 提前达峰情景下的2030年碳流图。单位为 10^4 t CO₂。发电部门碳排放含供热能耗产生的CO₂排放。为实现总量平衡，假定分品种能源损失和平衡差额均有CO₂排放。水、核、风能及其他非化石能源的碳排放系数均取为零。煤炭、石油和天然气的碳排放系数分别为 $2.772 \text{ t CO}_2 \cdot \text{tce}^{-1}$ 、 $2.156 \text{ t CO}_2 \cdot \text{tce}^{-1}$ 和 $1.643 \text{ t CO}_2 \cdot \text{tce}^{-1}$ 。由于四舍五入，分品种、分部门碳平衡可能存在微小差异。

5. 结论

通过对既定达峰和提前达峰两种情景下的能源供需和碳排放数据分析, 可得到以下结论: ①2030年前一次能源和电力需求将持续增长, 由于能源低碳转型促使电气化水平快速上升, 电力需求增速将显著快于一次能源需求; ②低碳化是能源供需结构变化的基本特征, 2030年前非化石能源将超过石油成为第二大能源, 但煤炭仍将是第一大能源; ③选择能效更高的能源消费模式和更加低碳的能源供应方式, 能源消费产生的碳排放可能在2025年左右提前达峰; ④发电是非化石能源开发利用的主要方式, 同时产生了近一半的碳排放, 因此电源结构的低碳化是碳排放尽早达峰、降低峰值的关键因素。

References

- [1] Wang F, Wu L, Yang C. Driving factors for growth of carbon dioxide emissions during economic development in China. *Econ Res J* 2010;(2):123–36. Chinese.
- [2] Chai Q. The decomposition of China's carbon dioxide emission peak. *China Policy Rev* 2015;(7):54–6. Chinese.
- [3] Qu S, Guo C. Forecast of China's carbon emissions based on STIRPAT model. *China Popul Resour Environ* 2010;20(12):10–5. Chinese.
- [4] Jiang K, He C, Zhuang X, Liu J, Gao J, Xu X, et al. Scenario and feasibility study for peaking CO₂ emission from energy activities in China. *Adv Clim Change Res* 2016;12(3):167–71. Chinese.
- [5] Ma D, Chen W. Analysis of China's 2030 carbon emission peak level and peak path. *China Popul Resour Environ* 2016;26(5):1–4. Chinese.
- [6] Yang X, Fu L, Ding D. Issues on regional CO₂ emission peak measurement: Taking Beijing as an example. *China Popul Resour Environ* 2015;25(10):39–44. Chinese.
- [7] Liu Q, Li Q, Zheng X. The prediction of carbon dioxide emissions in Chongqing based on fossil fuel combustion. *Acta Scientiae Circumstantiae* 2017;37(4):1582–93. Chinese.
- [8] Cheng L, Xing L. Analysis of requirement and impact of power development under the peak carbon emissions in 2030. *Electric Power* 2016;49(1):174–7.
- [9] Guo S. Industrial carbon peak management in the stage of climate change. *Energy Conserv Environ Prot* 2016;(7):50–3. Chinese.
- [10] Goldstein G, Tosato G, editors. Global energy systems and common analyses. Report. Paris: International Energy Agency; 2008 Jun.
- [11] Energy Information Administration (EIA). The national energy modeling system: An overview. Report. Washington, DC: EIA; 2009 Oct. Report No.: DOE/EIA-0581.
- [12] International Atomic Energy Agency (IAEA). Model for Analysis of Energy Demand (MAED-2): User's manual. Vienna: IAEA; 2006 Jan.
- [13] National Institute for Environmental Studies. Asia-Pacific Integrated Model. Tokyo: National Institute for Environmental Studies; 1997 Mar.
- [14] Stockholm Environment Institute (SEI). LEAP user guide. Boston: SEI; 2006 Mar.
- [1] Wang F, Wu L, Yang C. Driving factors for growth of carbon dioxide emissions