

化石能源非能利用需求和碳排放研究

王利兵*, 张赟, 郑炜, 文亚, 王皓界

(全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031)

Research on Demand and Carbon Emissions of Non-energy Use of Fossil Energy

WANG Libing*, ZHANG Yun, ZHENG Wei, WEN Ya, WANG Haojie

(Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China)

Abstract: As the consumption and carbon emissions of the non-energy use of fossil energy rising year by year, its impact on the 2 °C global temperature target gradually appears. Firstly, the basic principles, status quo, development trends, and key technologies of the non-energy use of fossil energy are analyzed, as well as the accounting method of consumption and carbon emissions of the non-energy use of fossil energy based on basic chemicals. The results show that non-energy use of fossil energy has the carbon sequestration effect and about 50%~70% of the carbon in fossil feedstock is stored in terminal chemical products such as plastic, but poor management of chemical waste will lead to the leakage of stored carbon. Secondly, two scenarios are designed and the logistic regression method is implemented to predict the demand for basic chemicals and non-energy use of fossil energy. In the baseline scenario, the demand for basic chemicals will reach 1 billion tons by 2050. Finally, a cost minimization model is built to forecast the demand for fossil feedstock. The results show that, in the baseline scenario, the demand for non-energy use of fossil energy will reach more than 2 billion tons of standard coal, and the average annual growth rate will be 1.4% during 2017-2050. In the low-carbon scenario, the demand for non-energy use of fossil energy will drop 23% compared with the baseline scenario by 2050. Natural gas will accelerate to be the main fossil feedstock, and low-carbon chemical technologies using hydrogen and biomass as raw materials will develop rapidly.

Keywords: non-energy use; fossil energy; basic chemicals; cost minimization model

摘要: 化石能源非能利用的消费量和碳排放量呈现逐年上升态势, 对全球2 °C温控目标的影响逐步显现。首先, 分析

了全球化石能源非能利用的基本原理、现状和趋势、关键技术, 以及基于基本化工品的化石能源非能利用消费量和过程碳排放核算方法。结果表明, 化石能源非能利用具有一定的固碳作用, 化石原料中50%~70%的碳元素将长期存储在塑料等终端化工产品中, 但是化工产品废弃物管理不善将导致这些存储的碳元素外泄。其次, 设计了基准情景和低碳情景, 并运用对数回归拟合法对基本化工品和化石能源非能利用的需求量进行预测。结果显示, 基准情景下, 2050年基本化工产品需求将超过10亿t。最后, 建立了化石原料需求预测的成本最小化模型。结果显示, 基准情景下, 2050年化石能源非能利用需求将超过20亿tce, 2017—2050年的年均增长率为1.4%。低碳情景下, 2050年化石能源非能利用需求相对于基准情景下降23%, 天然气将加速成为主要的化石能源原料, 以氢能和生物质为原料的低碳化工技术迅速发展。

关键词: 非能利用; 化石能源; 基本化工品; 成本最小化模型

0 引言

工业革命以来, 化石能源主要作为燃料使用, 有力促进了人类社会繁荣发展, 但也带来了资源匮乏、气候变化、环境污染、贫困健康等问题, 严重威胁人类可持续发展^[1]。化石能源除了用作燃料, 还可以作为非能源使用, 即作为原料或非能源使用的产品, 经过物理或化学加工转换为其他产品, 如塑料、纤维、润滑剂等化工品。当前, 化石能源的非能源使用主要集中于石油化工行业, 为其提供重要的生产原料。为引导化石能源改变传统的燃烧利用方式, 2021年中央经济工作会议明确提出, 化石能源新增原料用能不纳入能源消费总量控制。

现有文献中, 关于化石能源非能利用的研究主要集中在发展战略、碳排放核算、脱碳技术与路径等方面。文献[2]提出要加快能源转型, 以“两个替代、

基金项目: 全球能源互联网集团有限公司科技项目 (SGGEIG00JYJS2100049)。

Science and Technology Foundation of Global Energy Interconnection Group Co., Ltd. (SGGEIG00JYJS2100049).

一个提高、一个回归、一个转化”为转型方向来构建全球能源互联网，其中化石能源要以非能利用形式回归其基本属性，主要作为工业原料和原材料使用，为经济社会发展创造更大价值、发挥更大作用。文献[3-6]从战略上提出要转变化石能源利用方式，推动化石原料从能源转向资源化利用、原料利用，助力中国实现碳中和，推动构建循环经济和实现能源转型。文献[7]采用《1996年IPCC国家温室气体清单指南》层级1方法（IPCC-RA）核算化石能源非能利用的碳排放，发现化工产品存储碳元素的比例高达60%~70%。文献[8-9]针对化石能源非能利用消费量统计不准确的问题，基于物质流方法创建了化石能源非能利用碳排放核算模型（non-energy use emission accounting tables, NEAT），并详细讨论了化石能源非能利用碳排放的核算范围、关键问题和不确定性。文献[10]运用NEAT模型核算了美国、韩国和意大利的化石能源非能利用量和相应的碳排放，并与统计数据对比分析，发现误差在±15%以内。文献[11]运用自下而上的方法建立了化石能源非能利用量核算框架，并与统计数据对比。文献[12]指出化石能源非能利用的排放量存在较大不确定性，且对总二氧化碳（CO₂）排放量的影响超过10%。为实现中国碳达峰、碳中和目标，文献[13-16]提出要转变石油化工行业的化石原料结构，发展绿色原料、提高生产效率、加快氢能应用和CO₂资源化利用技术创新等。文献[17]研究了废弃物管理对于减少化石能源非能利用碳排放的作用。

由于化石能源非能利用的技术路线复杂多样，产品成千上万，生产过程中物质流和能量流相互交错，数据统计困难，因此开展化石能源非能利用的需求与碳排放核算等研究比较困难。本文对化石能源非能利用进行初步研究，首先分析了化石能源非能利用的现状、发展趋势和主要技术，以及基于终端化工产品的非能利用消费量和碳排放的核算方法；然后设计了基准情景和低碳情景，运用对数回归拟合法对基本化工品的需求量进行预测；最后建立了基于成本最小化的化石能源非能利用需求量预测模型，给出两种情景下非能利用需求和过程碳排放的预测结果。

1 化石能源非能利用现状与趋势

1.1 化石能源非能利用现状

化石能源非能利用主要发生在有机化工领域，主要涉及到化工行业的各种生产技术和产品。化工行

业产品流向简图如图1所示。煤炭（合成气、焦炉煤气等）、石油（石脑油、乙烷、液化石油气等炼油产品）、天然气为主要生产原料，加上水、二氧化碳、氧气、氮气等其他辅助资源，经过合成、裂解、重整、加氢等复杂的工艺流程转化为基本化工品，包括高价值化学品（乙烯、丙烯等烯烃和苯、甲苯、二甲苯等芳香烃，简称HVC）、合成氨、甲醇、丁二烯、炭黑等。基本化工品经过聚合等流程进一步转化为塑料、橡胶与纤维等合成材料、氮肥等农用化学品、油漆等专用化学品等终端产品。这些化工品在交通、轻工、农业、纺织和民用等多个领域发挥重要作用，与人类生产生活密不可分。终端产品在寿命期结束后，部分进入废弃资源回收系统，通过物理或化学处理，以再生产品或再生原料的形式被重新利用。

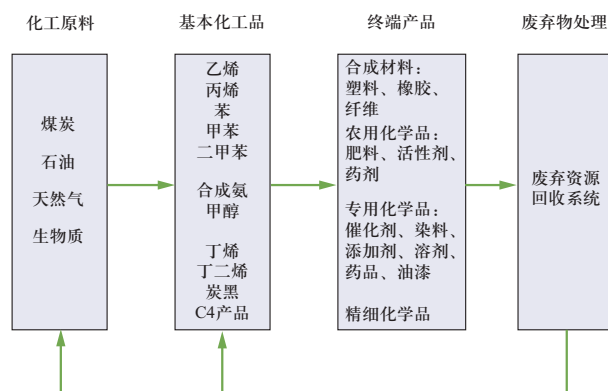


图1 化工产品流向简图

Fig. 1 Flow diagram of chemical products

2017年，全球有机化工领域投入约6亿t石油产品、1050亿m³天然气、0.8亿t煤炭作为生产原料，最终产生氮肥2.9亿t、合成材料4.2亿t、其他产品2.5亿t。HVC、合成氨、甲醇等基本化工品是化工行业的“基石”，是后续生产各种终端化工产品的基础，生产这些基本化工品所消耗的能量占化工部门能源消费总量的75%以上。

除了用作化工原料，部分化石能源还能作为非能源产品直接使用。具体利用方式包括：炼油装置产生的部分副产物直接（不再经过化学转化制作成沥青、润滑油、石蜡等）当作填充剂或稀释液使用；以固体碳的形式，在原铝、铁合金等冶金过程和无机化合物合成过程中充当还原剂。

化石能源非能利用的消费量和碳排放呈现逐年上升态势。1990—2019年，全球化石能源非能利用的能量量翻了一番，从6.8亿tce增加到13.2亿tce，占

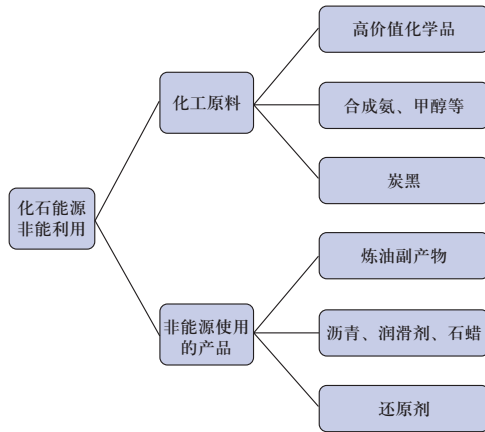


图2 化石能源非能利用的方式

Fig. 2 Non-energy use ways of fossil fuels

全球一次能源消费总量的比重从5.5%增加到6.8%^[18]。各类化石能源的非能利用量变化情况如下: 煤炭从0.4亿tce提高到0.7亿tce, 年均增速2.2%; 石油从5.2亿tce提高到9.7亿tce, 年均增速2.2%; 天然气从1.3亿tce提高到2.8亿tce, 年均增速2.7%。煤炭、石油、天然气的非能利用量占各自一次能源消费总量的比例依次从1.2%、11.2%、5.4%上升至1.4%、15.2%、5.8%。1990—2019年, 化石能源非能利用的碳排放量从8.9亿t增加到16.6亿t, 占全球化石能源利用和工业过程总碳排放量的比重从3.9%增加到4.4%^[19]。

1.2 化石能源非能利用发展趋势

石化产品需求与经济发展密切相关, 随着经济的发展和人口的增长, 全球对石化产品的需求日益增加。1990—2019年, 全球化石能源非能利用消费及碳排放的变化趋势如图3所示。当前, 全球人均石化产品需求处于较低水平, 且各国差异较大。以塑料和化肥为例, 美国、日本等发达国家每年人均塑料和化肥消费量分别为55~90 kg、85~135 kg, 发展中国家的每年人均塑料和化肥消费量分别为4 kg、12~60 kg。随着经济发展和生活水平的提高, 以及电子商务等在线消费不断刺激包装业发展, 以塑料为代表的化工品需求仍保持迅速增长。同时, 基于化石能源的化工新材料、高端精细化工品在电子信息、新能源、航空航天和生物医药等战略产业中的需求也在迅猛增长。

化石能源加快向原料利用方式转变。据测算, 燃烧利用会严重低估化石能源的价值。以煤炭为例, 每t煤炭用于发电产生的经济价值约为950元, 而利用先进的煤化工技术, 每t原煤转化为烯烃的经济价值是

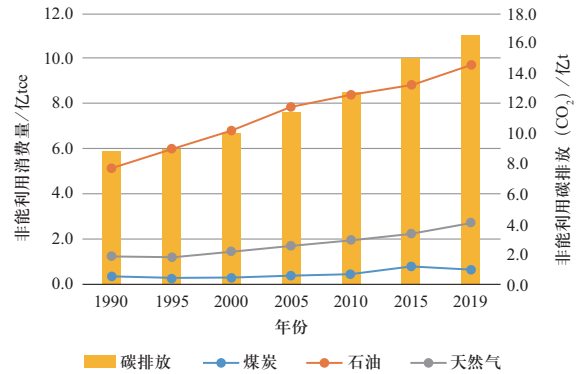


图3 1990—2019年全球化石能源非能利用消费及碳排放情况

Fig. 3 Global consumption of non-energy use of fossil energy and carbon emission from 1990 to 2019

发电的2倍以上; 若利用煤炭制取高端碳纤维, 价值是发电的5倍以上。煤炭种类繁多, 碳多氢少, 结构和化学组成丰富而多变, 具有从石油或人工合成难以得到的特殊芳香结构。煤炭通过热解、气化等技术, 向下游不断延长产业链, 可以生产特种蜡、聚 α -烯烃(PAO)润滑油等特殊化学品, 以及高性能的煤基超级活性炭、石墨烯、高性能碳纤维、炭复合材料、碳纳米管等功能性材料, 这将大大提高化石煤炭资源价值, 推动煤炭资源由“燃料型”向“原料型”转变^[20]。油气作为化工原料的规模正在加速增长, 将逐渐替代交通运输领域燃料而成为全球石油消费的最大推动力。据国际能源署(International Energy Agency, IEA)预测, 未来10年, 石化产品将占全球石油需求增长的1/3以上, 到2050年将占到近1/2^[21]。

2 化石能源非能利用主要技术

生产基本化工品, 既有传统的基于化石原料的技术, 又有基于生物质、氢能的低碳技术, 这些技术在原料需求、产品多样性和碳排放强度等方面差异较大。

1) 传统技术。

乙烯、丙烯和芳烃的主要生产技术有蒸汽裂解、石脑油催化裂化(NCC)、煤基甲醇制烯烃/芳烃(C-MTO/C-MTA)、丙烷脱氢(PDH)、甲醇制烯烃/芳烃(MTO/MTA)。除了上述技术外, 部分HVC来自炼油过程, 如部分丙烯源自重油催化裂化(FCC), 大部分芳烃来自FCC、催化重整和煤焦油副产。催化重整、蒸汽裂解技术目前仍占主导地位, 这两项技术

生产的乙烯占2018年全球乙烯生产量的80%以上。不同地区的蒸汽裂解技术采用的原料差别较大,欧洲和亚洲以石脑油为主,北美主要使用乙烷,中东以石脑油和乙烷为主。由于乙烷具有收率高、能耗低、流程短、成本低等优势,是未来乙烯生产的发展方向^[22]。2019年,全球以石脑油为原料生产乙烯的占比从2018年的52%下降到50%左右,而以乙烷裂解生产乙烯的占比从23%上升至25%左右。中国现代煤化工技术发达,利用煤制甲醇、再制烯烃和芳烃的技术较成熟,2019年煤制乙烯产能在720万t左右,在中国乙烯行业总产能中的占比为25%。

合成氨的主要生产技术包括基于天然气的蒸汽重整法(NSR-A)、基于重油的部分氧化法(POX-A)、基于煤炭的气化法(CGS-A)。国外合成氨生产以NSR-A为主,中国合成氨生产以煤炭为主,2016年采用CGS-A生产的合成氨占比约为76%。

甲醇的主要生产技术包括基于天然气的蒸汽重整法(NSR-M)、基于重油的蒸汽重整法(OSR-M)、基于煤炭的气化法(CGS-M)、基于焦炉煤气的重整法(COG-M)。国外甲醇生产以NSR-M为主,中国甲醇生产以煤炭和焦炉煤气为主,2017年采用CGS-M和COG-M生产的甲醇占比分别为73%和14%。

炭黑的生产技术主要包括基于煤焦油的深加工技术、基于石油的蒸汽裂解和催化裂解技术、基于天然气的热裂解技术。中国炭黑生产以煤炭为主,国外炭黑生产以油气为主。沥青、润滑油大部分基于炼油重质副产物提炼生成。原铝生产中需消费大量的炭阳极,炭阳极主要由石油焦等加工形成。

同一种技术选用不同的原料(石脑油、乙烷、液化石油气、天然气、煤炭等)时,得到的中间产品份额不同,生产过程消耗的能源也不同。对于蒸汽裂解技术,以乙烷为原料,乙烯收率高达80%左右,丙烯等其他副产物收率很低,生产1 t烯烃需要消耗1.2 t乙烷原料,燃烧过程消耗17.1 GJ能源。而以石脑油为原料,乙烯收率约为35%,另外还会生成种类丰富的丙烯、丁烯、芳烃等副产物,生产1 t烯烃需要消耗1.8 t石脑油原料,燃烧过程消耗14.5 GJ能源。

2) 低碳技术。

基于氢能的低碳技术主要有绿氢制氨(P2H-A)、绿氢制甲醇(P2H-M)、绿氢制烯烃/芳烃(P2H-MTO/MTP)。基于氢能的低碳技术首先是采用清洁电解水制氢(P2H),P2H-A技术还包括空气分离氮气和氨合成过程。P2H-M技术还包括CO₂捕集和甲醇合成

过程。P2H-MTO/MTP技术除了CO₂捕集和甲醇合成过程,还包括醇制烯烃/芳香烃过程。这种制取烯烃/芳烃的技术存在生产链条长、效率较低的问题,成本是传统以石油为原料的技术路线的3倍以上。

基于生物质能的低碳技术主要有生物质气化制氨(BGS-A)、生物质气化制甲醇(BGS-M)、生物乙醇脱水制烯烃/芳烃(BDH)。基于生物质能的低碳技术的第一步是生物质能预处理和气化过程,BGS-M还包括水煤气变换与甲醇合成;BGS-A还包括水煤气变换与氨合成,与煤气化技术类似;BDH还包括发酵、蒸馏和乙醇脱水过程。

氢能、生物质等低碳化工技术由于成本较高,目前应用规模还较小。随着可再生电力成本快速下降,基于绿氢与二氧化碳的低碳化工技术的优势将逐步显现。随着效率提升和制氢成本下降,预计到2060年,清洁电能制氢的成本将下降到\$1.0~1.1/kg,电制氨、电制甲醇的成本都将下降至约\$0.25/kg,竞争力显著提升^[23]。全球生物质资源丰富,其开发利用具有负碳排放作用。随着碳排放约束加强,以及生物质气化技术、生物质基乙醇制烯烃技术逐渐成熟,生物质技术路线的成本将持续下降,在化工领域的应用将越来越广泛。

表1 低碳化工技术的生产特性^[24]

Table 1 Production characteristics of low-carbon chemical technologies

技术	生产能耗 /(GJ·t ⁻¹)	CO ₂ 或生物质原料投入 /(t·t ⁻¹)	相比常规技术减少CO ₂ 排放 /(t·t ⁻¹)	生产成本 /(\$·t ⁻¹)
绿氢制氨	45.1	0	1.71	784~896
绿氢制甲醇	39.7	1.37	1.53	336~728
绿氢制乙烯	95.5	3.2	1.89	750~2128
绿氢制芳烃	171.0	5.9	1.70	1456~3136
生物质制甲醇	14.6	2.6	1.57	224~560
生物质制乙烯	85.5	10.5	3.05	2250~3136
生物质制丙烯	95.5	5.9	0.99	2200~2500
生物质制芳烃	72.0	11.2	1.54	>3 360

3 化石能源非能利用消费量与碳排放核算

3.1 化石能源非能利用消费量核算

化石能源非能利用需求量 NEU 可以用下式表示:

$$N_{EU} = N_{EUF} + N_{EUR} \quad (1)$$

式中: N_{EUF} 是化工原料消费量, GJ; N_{EUR} 是非能源利用产品的消费量, GJ。

$$N_{EUF} = \sum_i D_{Eth}^i E_{Eth}^i + \sum_i D_{Am}^i E_{Am}^i + \sum_i D_{Me}^i E_{Me}^i + \sum_i D_{Ca}^i E_{Ca}^i \quad (2)$$

式中: D_{Eth}^i 、 D_{Am}^i 、 D_{Me}^i 、 D_{Ca}^i 分别是采用技术 i 生产乙烯、合成氨、甲醇和炭黑的产量, t; E_{Eth}^i 、 E_{Am}^i 、 E_{Me}^i 、 E_{Ca}^i 分别是相应产品的原料消耗强度, GJ/t, 有全口径和净口径之分。本文以下计算均采用全口径。

$$N_{EUR} = D_{Ar} E_{Ar} + D_{Al} E_{Al} + D_{Bi} E_{Bi} + D_{Lu} E_{Lu} \quad (3)$$

式中: D_{Ar} 、 D_{Al} 、 D_{Bi} 、 D_{Lu} 分别是炼油副产烃类、炭电极、沥青、润滑剂消费量, t; E_{Ar} 、 E_{Al} 、 E_{Bi} 、 E_{Lu} 分别是相应产品的原料消耗强度, GJ/t。

基本化工品生产过程的全口径原料消耗强度、净口径原料消耗强度和单位产品生产过程碳排放如表2所示。

表2 基本化工品生产原料消耗强度和碳排放强度^[11]

Table 2 Intensity of feedstock consumption and carbon emission in producing basic chemicals

产品	投入化工原料	全口径原料消耗强度/ (GJ·t ⁻¹)	净口径原料消耗强度/ (GJ·t ⁻¹)	生产碳排放 (CO ₂) / (t·t ⁻¹)
乙烯	石脑油	136±20	100±15	1.9±0.2
	汽油	142±21	105±16	2.4±0.2
	乙烷	60±9	40±6	0.8±0.1
	丙烷	88±13	67±10	1.1±0.1
合成氨	汽油、重油	35±7	25±5	2.8±0.3
	天然气	35±7	25±5	1.8±0.2
	煤炭	35±7	25±5	3.3
甲醇	汽油、重油	35±7	27±6	1.5±0.1
	天然气	35±7	27±6	0.4±0.04
	煤炭	35±7	27±6	3.2±0.3
炭黑	煤焦油、重油	85±17	56±11	2.0±0.2
	天然气	85±17	56±11	0.2±0.02
炼油副产烃	石油	40.5	40.5	0
炭电极	石油、煤炭	17.5	17.5	1.5±0.2
沥青	石油	40.2	40.2	0
润滑剂	石油	40.2	40.2	0

3.2 化石能源非能利用碳排放量核算

基本化工品在生产过程中需要投入一定的化石燃料和化工原料, 其中化石燃料中的碳元素在燃烧时基本全部释放, 而化工原料中的碳元素部分进入到产品中存储起来, 部分以二氧化碳形式外排。核算化工原料的碳排放主要有两种方法, 一是IPCC-RA法, 二是NEAT模型。

1) IPCC-RA法。

IPCC-RA法是一种基于能源统计数据、自上而下的核算方法。化工原料的碳排放为投入的化工原料中的碳含量减去未氧化而长期存储的碳含量(寿命期20年以上的碳)。主要化工原料的固碳率和排放因子如表3所示。化石能源非能利用的碳排放 C^{RA} 可以表示为

$$C^{RA} = \sum_i N_{EUI} E_{Fi} (1 - P_i) \times 44/12 \quad (4)$$

式中: N_{EUI} 是第 i 种化工原料的消费量, TJ, 来源于能源统计年鉴; E_{Fi} 是第 i 种化工原料的排放因子, kg/GJ; P 是固碳率, %。

表3 化工原料的固碳因子

Table 3 Carbon sequestration factor of chemical feedstock

产品	固碳率	排放因子/(kg·GJ ⁻¹)
沥青	100%	25.8
乙烷	80%	17.0
汽油、柴油	50%	20.2
液化石油气	80%	17.2
润滑剂	50%	20.0
石脑油	80%	20.0
煤焦油	75%	22.0
天然气	33%	15.3

以上化工原料的固碳情况以油气为主, 而中国煤化工产业发达, 化工原料中煤炭占比较高, 煤炭作为原料的固碳情况如表4所示。对于煤制油、煤制气来说, 产品在末端燃烧时将释放全部CO₂, 故不具有固碳功能; 煤制尿素虽然利用部分CO₂作为原料, 但尿素进入土地分解时将释放几乎全部的CO₂, 因此也不具有固碳功能。

表4 煤化工生产路径的碳利用情况^[25]

Table 4 Carbon utilization of production path in coal chemical industry

生产路径	生产单位产品投入碳量/(t·t ⁻¹)	单位产品含碳量/(t·t ⁻¹)	固碳率
煤间接液化制油	3.36	0.87	26%

续表

生产路径	生产单位产品投入碳量/(t·t ⁻¹)	单位产品含碳量/(t·t ⁻¹)	固碳率
煤制天然气*	2.11	0.70	33%
煤制甲醇	1.20	0.38	32%
煤制烯烃	3.95	0.88	22%

*注:天然气单位为1000 m³。

2) NEAT模型。

NEAT模型采用产品流方法进行碳排放核算。将投入的化石原料中的碳元素含量 E_0 减去基本化工品生产过程中的碳排放 E_1 ,就是存储在基本化工品中的碳元素量,其原理如图4所示。对于每种基本化工品,部分用于下游中间化工品生产,生产过程产生碳排放 E_1 ,部分用于消费,其中氧化用途(ODU)释放的CO₂计入碳排放 E_2 ,非氧化用途(NODU)不释放CO₂。如乙烯大部分用于下游化工品生产,消费中ODU部分占比为95%,而沥青、润滑剂、炭黑、石油焦等不用于下游生产,消费中NODU占比为100%。中间化工品与之类似。对于终端消费品,其中ODU部分释放的CO₂计入碳排放 E_2 ,NODU不释放CO₂,会进入产品长期存储。例如塑料、合成纤维、合成橡胶等终端消费品,NODU用途的占比为100%。

生产过程碳排放 E_1 、消费过程碳排放 E_2 、非能利用碳排放 C^{NEAT} 和总储碳率 R 的计算方法如下:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \sum_i P_i C_i \\
 E_2 &= \sum_i (P_i - P_i^{down}) \times E_{Fi} \times O_{DUi} \\
 C^{NEAT} &= E_1 + E_2 \\
 R &= (E_0 - C^{NEAT \text{ or } RA}) / E_0
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

式中: P_i 是化工品 i 的消费量; C_i 是相应产品的生产碳排放强度,见表2; P_i^{down} 是化工品 i 用于下游化工品生产的投入量; O_{DUi} 是化工品 i 消费时氧化用途的比例。

3) IPCC-RA法与NEAT模型比较。

IPCC-RA法实施简单、易理解,但存在如下不足:非能利用的碳排放核算依赖非能利用消费量统计,存在统计遗漏或双重统计问题;固碳率数据精确度不高,仅表示全球平均情况;计算方法的目的是与边界不够明确。NEAT模型基于准确的产量数据,不依赖能源统计,计算流程清晰、准确,但是需要77种基本化工品、中间产品和终端产品的生产、消费和转化数据,且部分数据缺乏统计,较难获取。这两种方法得到的非能利用碳排放相差10%~20%,非能利用储碳率位于

60%~80%之间。

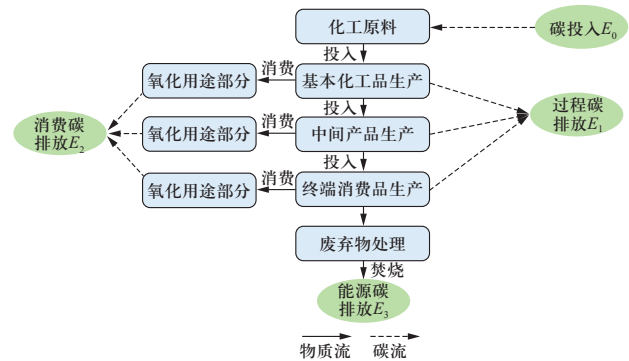


图4 NEAT模型计算碳排放的原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of calculating carbon emissions using the NEAT model

采用式(1)计算的2017年全球化石能源非能利用消费量(全口径)和式(4)计算的化石能源非能利用碳排放、固碳率如表5所示。化石能源非能利用消费量估算值与IEA统计值存在一定误差,总误差在5%以内。误差主要是由于IEA采用净口径统计,炼油副产烷烃和非能源使用的产品是否归属非能利用不清晰;而本文采用全口径统计,且仅依据8种基本化工品进行核算,覆盖范围有限。基于IEA化石能源非能利用统计值计算的非能利用碳排放达12.4亿t,总固碳率达51%。

表5 2017年全球化石能源非能利用消费量和碳排放
Table 5 Consumption and carbon emissions of the global non-energy use of fossil energy in 2017

非能利用化石能源	IEA (2017) 非能利用统计值/亿tce	非能利用估算值—基于式(1) /亿tce	非能利用CO ₂ 排放估算值—基于式(4) /亿t	固碳率
煤炭	2.0	3.4	0.6	70%
石油	27.4	26.4	8.6*	54%
天然气	7.7	6.4	3.2	33%
合计	37.0	36.3	12.4	51%

*注:IEA非能利用石油统计中,“其他石油产品”这一项的固碳率设定为20%。

4) 废弃物管理。

终端消费品寿命期结束后需进行废弃物处理,废弃物处理包括物理回收、化学回收、焚烧、填埋与遗弃四种方式。其中,填埋和遗弃的处理成本较小,但会对水体、土壤造成较大污染。焚烧有露天焚烧和垃圾发电厂做燃料处理两种方式,后者对环境污染较小,但仍会产生碳排放 E_3 。物理回收除了收益小、分拣难度大、成本高,还存在降级利用、利用率不高的问题。

化学回收在分子层面实现重新利用, 通过高温催化、裂化将塑料变成单体后又重新作为原料生产产品, 发展前景较好, 但技术尚不成熟。当前, 全球塑料废弃物以焚烧、填埋与遗弃为主, 回收处理率不足30%。

4 化石能源非能利用需求与碳排放建模

4.1 情景设计

在全球2 °C温控目标下, 化工行业将加快低碳转型, 对化石能源非能利用造成较大影响。本文设计两种情景: 基准情景 (baseline scenario, 简称BS) 和低碳情景 (low-carbon scenario, 简称LC), 以研究化石能源非能利用的需求潜力。

BS情景延续目前石化产品高速增长的趋势, 废弃塑料等资源回收利用进展缓慢, 能效提升较慢, 终端产品需求快速增长, 碳排放总量不受约束。LC情景中, 废弃资源回收利用水平显著提升, 生物质降解塑料等替代塑料快速推广, 终端产品需求增速降低, 生产能效提高较快, 碳排放总量大幅减少。考虑废弃资源回收率、生物质基塑料替代、能效提升的影响, 假定LC情景中, 全球基本化工品、合成氨、甲醇的需求量在2030年、2050年相对BS情景分别减少8%、15%; 沥青、润滑油、电解铝的需求量在2030年、2050年相对BS情景分别减少5%、10%。

4.2 基本化工品需求量预测

基本化工品的需求量与人口、国内生产总值 (gross domestic product, GDP) 等因素密切相关。基于2000—2020年历史消费数据和人均GDP数据, 运用对数回归拟合法对乙烯、合成氨和甲醇的产量进行拟合, 结果如图5所示, 拟合优度 (R^2) 均大于0.8。全球人口、GDP、化石能源和CO₂价格来源于文献[26]。

综合运用对数回归拟合法和人均消费量法等, 预测BS和LC情景下全球基本化工品的需求量, 结果如图6所示。将部分典型化工产品的需求预测情况与IEA、国际可再生能源机构 (International Renewable Energy Agency, IRENA) 的预测进行对比, 如表6所示。表中上下限数据分别对应高低情景的预测结果。本文与其他机构的需求预测差异主要是由于采用的方法、考虑的影响因素和预测的目标不同所致 (如部分机构的需求预测是服务于全球2 °C/1.5 °C温控目标)。BS情景中, 2050年全球HVC、合成氨、甲醇的需求分别增长至6.4亿t、250亿t、180亿t, 较2017年分别增长80%、34%、

99%。随着人口增长, 居民生活水平提高, 塑料、纤维等化工产品的需求不断增加, 推动HVC需求上涨, 其中发展中国家的消费增长是主要推动力。甲醇需求增长主要是受下游需求和甲醇作为中间体制芳烃/烯烃的需求所驱动。合成氨主要受化肥等农业用途需求驱动。由于发达国家氨需求饱和, 发展中国家农业发展是合成氨消费增长的主要推动力。全球汽车消费增长推动炭黑需求增长约50%。沥青、润滑油、原铝的需求增长与经济增长基本同步, 涨幅为20%~30%。

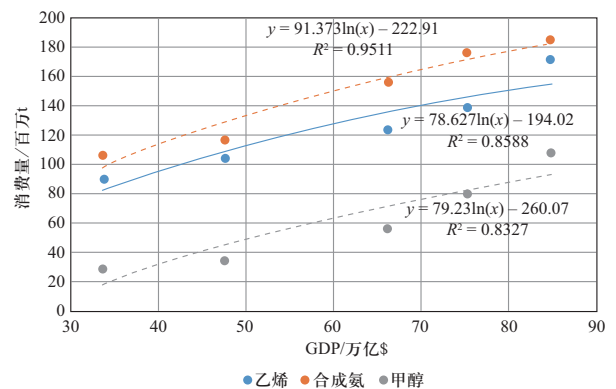


图5 典型化工品需求量拟合曲线

Fig. 5 Curve fitting of the demand for typical chemicals

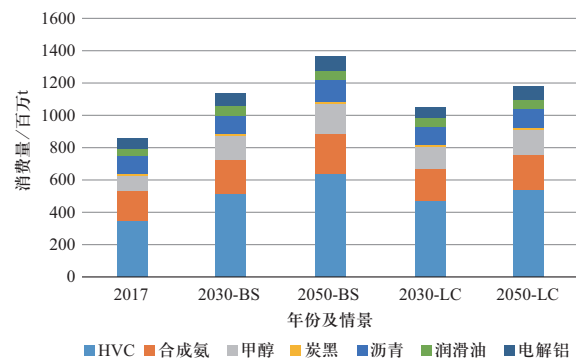


图6 基本化工品需求量预测情况

Fig. 6 Demand prediction of basic chemicals

表6 典型化工产品需求预测对比

Table 6 Comparison of demand prediction of typical basic chemicals

产品	IEA ^[21]		IRENA ^[27]	本文	
	2030年	2050年	2050年	2030年	2050年
乙烯/百万t	200~210	220~290	80~379	205~225	235~280
合成氨/百万t	210~220	230~260	106~440	196~213	212~250
甲醇/百万t	140~150	160~190	50~174	135~148	154~180

4.3 基础化工原料需求与碳排放

4.3.1 优化模型

影响化工原料需求的因素包括生产技术的建设成

本、运行成本、燃料和原料消耗强度与成本、碳排放强度、设备使用寿命等。对于HVC、合成氨和甲醇，由于存在多种生产技术，基于化石原料的传统技术与基于氢能、生物质的低碳技术相互竞争，形成最优技术组合。

1) 目标函数。

以展望期内建设成本、运行维护成本、燃料与原料成本等总成本最低为目标函数，建立基础化工原料生产组合优化模型。模型形式如下：

$$\min Y = \sum_{i \in K} \sum_{t \in T} \frac{C_1}{(1+r)^{(t-1)}} + \frac{C_2 + C_3 + C_4 - C_5}{(1+r)^t} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} C_1 = S_{i,t} I_{i,t} \\ C_2 = (S_{i,t} + R_{i,t}) M_{i,t} \\ C_3 = (S_{i,t} + R_{i,t}) U_{i,t} F_{i,t} P_{i,t} \\ C_4 = (S_{i,t} + R_{i,t}) U_{i,t} B_{i,t} H_{i,t} \\ C_5 = (G_i - R_{i,t}) O_{i,t} \end{cases}$$

式中：总成本 Y 包含新建产能的投资费用 C_1 、新建和现有产能的运行费用 C_2 、燃料费用 C_3 、原料费用 C_4 、退役产能的残值 C_5 五个部分， $\$$ ； i 是技术序列， K 是技术集合（HVC、合成氨、甲醇分别是8、6、7种）； t 是展望期年份， T 是展望水平年集（2017—2050年）； $S_{i,t}$ 是第 t 年第 i 种技术的新增产能， t ； $R_{i,t}$ 是第 t 年现役第 i 种技术的剩余产能， t ； $I_{i,t}$ 是第 t 年第 i 种技术的单位投资， $\$/t$ ； $M_{i,t}$ 是第 t 年第 i 种技术的单位运营费用， $\$/t$ ； $U_{i,t}$ 是第 t 年第 i 种技术的年利用小时，单位是 h ； $F_{i,t}$ 、 $P_{i,t}$ 是第 t 年第 i 种技术的燃料消费强度、单位燃料费用，单位分别是 GJ/t 、 $\$/GJ$ ； $B_{i,t}$ 、 $H_{i,t}$ 是第 t 年第 i 种技术的原料消费强度、单位原料费用，单位分别是 GJ/t 、 $\$/GJ$ ； G_i 是第 i 种技术的初始规模， t ； $O_{i,t}$ 是第 t 年第 i 种技术的退役机组单位容量残值， $\$/t$ ； r 是折现率，取8%。关于投资成本、单位燃料与原料参数的取值见文献[21,26]。

2) 约束函数。

模型中的约束条件包括产量平衡约束、原料资源约束、过程碳排放约束。

① 产量平衡约束

$$\sum_{i \in K} (S_{i,t} + R_{i,t}) U_{i,t} = D_t \quad (7)$$

式中： D_t 是第 t 年终端产品需求量，预测结果见4.2节。需要注意的是，30%~50%的丙烷需求和60%~80%的芳香烃需求通过炼油副产满足， D_t 需要排除这部分的需求量。

② 原料资源约束

$$(S_{i,t} + R_{i,t}) U_{i,t} F_{i,t} \leq E_{i,t} \quad (8)$$

式中： $E_{i,t}$ 是第 t 年基本化工品 i 的原料资源限值。

③ 生产过程碳排放约束

$$\sum_{i \in K} (S_{i,t} + R_{i,t}) U_{i,t} B_{i,t} C_{i,t} \leq C_t^{\text{tot}} \quad (9)$$

式中： $C_{i,t}$ 是第 t 年基本化工品 i 生产过程碳排放强度，单位 $t \text{ CO}_2/t$ ，见表2； C_t^{tot} 是第 t 年基本化工品生产过程碳排放的上限值。

该优化模型属于线性规划（linear programming, LP）模型，基于GAMS/CPLEX平台环境进行求解，优化变量是第 t 年第 i 种技术的新增产能 $S_{i,t}$ ，优化变量数量为 $K \times T$ ，求解时间约2~4s。对于BS情景，优化模型不包括碳排放约束（9）；对于LC情景，优化模型包括碳排放约束（9）。假定到2030年、2050年， C_t^{tot} 是BS情景中相应年份碳排放的50%、30%。

4.3.2 优化结果

1) 化石原料需求。

2050年两种情景下基本化工品的生产技术组合如图7所示。在BS情景中，由于没有碳排放约束，优化模型将根据成本最小选择技术组合，继续延续目前低成本、高碳的生产路线。生产基本化工品的原料仍以油气为主，在后期逐渐向天然气过渡；煤炭使用减少；高成本的氢能和生物质能原料的应用比例较低。两种情景下基本化工品生产原料的需求量预测结果如图8所示。2030年、2050年，生产HVC、合成氨、甲醇的化石原料需求总量分别增至854 Mtoe、1027 Mtoe，较2017年分别增加40%、70%。 CO_2 与生物质能等新型原料需求为28 Mt、71 Mt。2050年，生产HVC的化石原料需求约为682 Mtoe，HVC产量中石脑油裂解、乙烷裂解技术仍占主导，占比分别为55%、22%，丙烷脱氢、石脑油催化裂化等新型技术占比为6%，生物质乙醇脱水、甲醇制烯烃/芳烃等技术路线占比仅7%。2050年，生产合成氨的化石原料需求约200 Mtoe，合成氨产量中天然气重整、煤气化路线占比分别为75%、20%，绿氢制氨和生物质气化制氨路线仅占5%。2050年，生产甲醇的化石原料需求约为147 Mtoe，甲醇产量中天然气重整、焦炉煤气化路线占比分别为59%、8%，高碳的煤炭气化路线下降至30%，绿氢制甲醇和生物质气化制甲醇路线仅占3%。

在LC情景中，由于存在碳排放限制，生产基本化工品的原料加快向天然气过渡，高碳煤炭的使用大幅减少，基于氢能、生物质原料的较高成本的技术路线

开始大幅应用。生产HVC、合成氨和甲醇的化石原料需求在2030年、2050年分别增至741 Mtoe、726 Mtoe, 较BS情景分别减少13%、29%, CO₂与生物质能等新型原料需求达63 Mt、173 Mt。2050年, 生产HVC的化石原料需求约为471 Mtoe, HVC的产量中乙烷裂解技术占比提升至30%, 丙烷脱氢、石脑油催化裂化、生物质乙醇脱水等新型技术占比提升为15%, 受绿氢制甲醇成本下降的影响, 甲醇制烯烃/芳烃路线占比大幅提升至10%。2050年, 生产合成氨的化石原料需求约为146 Mtoe, 合成氨产量中天然气占比上升至78%, 煤炭占比大幅下降至4%, 绿氢制氨产量占比大幅提升至15%。2050年, 生产甲醇的化石原料需求约109 Mtoe, 甲醇产量中天然气重整路线占比上升至68%, 煤气化路线占比下降至10%, 绿氢制甲醇和生物质制甲醇的路线占比大幅提升至15%。

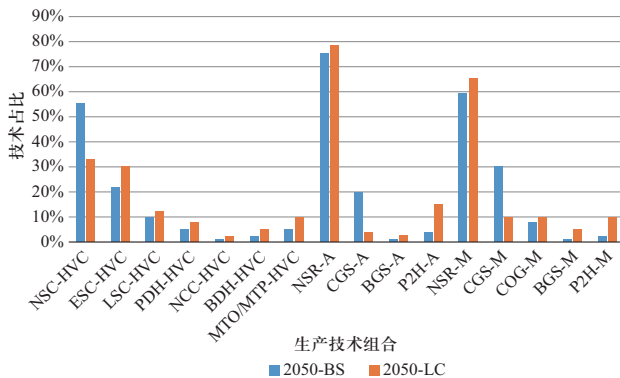


图7 2050年两种情景下基本化工品的生产技术组合

Fig. 7 Technologies mix of producing basic chemical products in two scenarios in 2050

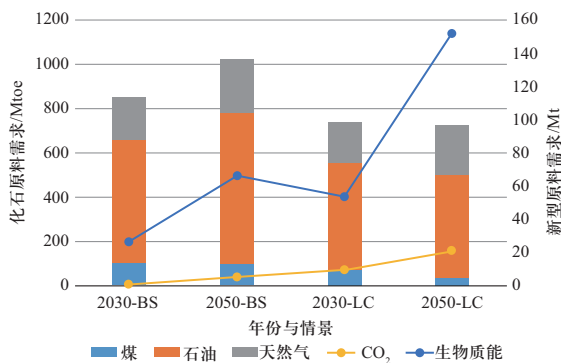


图8 两种情景下基本化工品生产原料需求量预测

Fig. 8 Feedstock demand prediction of producing basic chemicals in two scenarios

2) 过程碳排放。

基本化工品生产过程的碳排放预测结果如图9所示。在BS情景中, 2030年、2050年生产HVC、合成氨和甲醇的过程碳排放增至940 Mt、1036 Mt。在LC情

景中, 由于碳排放约束限制, 生产基本化工品将选择成本较高的氢能、生物质原料技术, 同时油气原料技术+碳捕集、利用与封存 (carbon capture, utilization and storage, CCUS) 的应用大幅提升。由于氨和甲醇生产过程中的碳排放浓度较高, 碳捕集成本较低, 2050年CCUS在化石原料生产合成氨装置中的应用比例超过65%。2030年、2050年, 生产HVC、合成氨和甲醇的过程碳排放降至470 Mt、295 Mt。

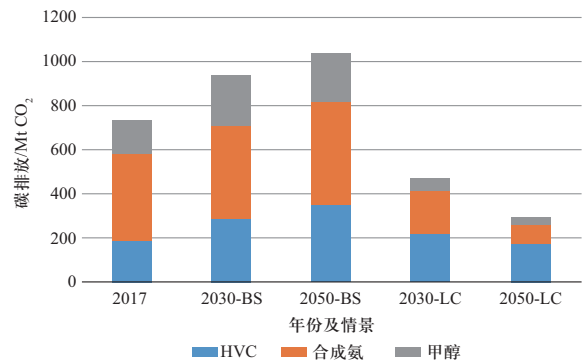


图9 两种情景下基本化工品生产过程的碳排放预测

Fig. 9 Carbon emission prediction of producing basic chemicals in two scenarios

4.4 化石能源非能利用需求与碳排放

1) 非能源使用产品。

化石能源非能利用需求和碳排放的预测结果如图10所示。在BS情景中, 2050年炭黑、沥青、润滑油、炼油副产芳烃和碳极等非能源产品和还原剂的需求增至438 Mtoe, 较2017年增长53%。在LC情景中, 由于需求下降和生产工艺改善, 2050年非能源产品和还原剂的需求相比BS情景减少11%, 碳排放减少30%。

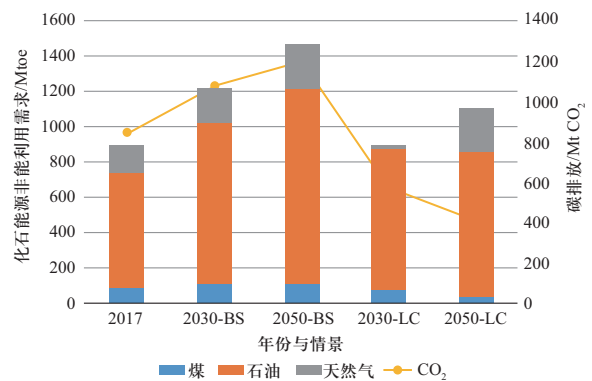


图10 两种情景下化石能源非能利用的需求和碳排放预测

Fig. 10 Feedstock demand and carbon emission prediction of non-energy use of fossil energy in two scenarios

2) 化石能源非能利用。

结合基础化工原料、非能源产品和还原剂的预测

结果, BS情景中, 2017—2050年全球化石能源非能利用量从892 Mtoe增至1440 Mtoe, 年均增长率为1.4%。其中, 煤炭、石油和天然气需求量的年均增长率依次为0.6%、1.6%和1.6%。生产过程的碳排放增至12亿t CO₂。LC情景中, 2050年全球化石能源非能利用量增至1120 Mtoe, 年均增长率为0.7%。其中, 煤炭、石油和天然气需求量的年均增速依次为-2.5%、0.8%和1.4%。生产过程的碳排放增至4.1亿t CO₂。

4.5 不确定性讨论

化石能源非能利用及碳排放预测的不确定性主要来源于以下三个方面。1) 统计口径。利用原料消费强度核算化工原料需求时, 存在全口径和净口径原料消耗强度之分, 一般相差10%~20%, 主要是由于很多生产工艺中能量流和物质流互相交错, 部分化工原料被用于本装置或相连的其他装置燃烧产生热量, 难以做出准确统计。炼油化工一体化之后, 原料消费情况更加复杂。2) 终端需求。一方面, 经济发展和人口增长推动塑料等石化产品需求增长; 另一方面, 加大废弃塑料回收利用、发展生物质可降解塑料等政策措施将减少产品需求, 但资源回收利用技术面临着回收标准、回收体系建设、经济性等方面的挑战。这些因素导致的需求不确定性对未来化工原料需求预测存在影响。3) 低碳技术发展。绿氢制化学品技术、生物化工技术、高效率化学转化技术的发展有利于减少传统油气原料需求, 低能耗、低成本CCUS技术的发展有利于增强传统油气化工技术竞争力, 但这些低碳化工技术成本下降的程度、关键技术和设备的突破仍面临较大不确定性, 将对未来油气原料需求产生影响。其他不确定性因素对非能利用需求也存在影响, 如碳市场配额分配、碳价等。这些不确定性因素对与化石能源非能利用需求和碳排放的具体影响, 还有待于在后续工作中研究。

5 总结

本文梳理了全球化石能源非能利用的基本原理、发展现状与趋势, 以及涉及的关键产品和技术, 分析比较了非能利用消费量和碳排放的核算方法, 建立了基于成本最小化的化石能源非能利用需求量预测模型, 并给出两种情景下的预测结果。

1) 1990—2019年, 全球化石能源非能源利用量占全球一次能源消费总量的比重增加到6.8%, 碳排放增

加至16.6亿t, 占全球化石能源利用和工业过程总排放的比重增加至4.4%, 对全球2 °C/1.5 °C温控目标的影响逐渐增大。

2) 化石能源非能利用的经济、社会价值巨大, 化石能源将加快从燃料利用向原料利用方式转变, 这将逐渐成为未来化石能源需求增长的主要推动力。

3) 化石能源非能利用具有一定的固碳作用, 化工原料中50%~70%的碳元素长期存储在塑料等终端产品中, 但产品寿命期结束后的废弃物管理不善将导致这些存储的碳元素外泄。

4) 基准情景下, 2050年HVC、合成氨和甲醇等基本化工产品的需求将达到10亿t以上, 生产这些基本化工品的化石原料和非能源使用的产品需求量将达到20亿tce以上。2017—2050年化石能源非能利用量年均增长1.4%。低碳情景中, 在大力提高资源回收利用水平、碳排放总量大幅受限的情况下, 2050年化石能源非能利用需求相比BS情景下降23%, 2017—2050年年均增长0.7%, 天然气加速成为主要的化石能源原料, 以氢能、生物质为原料的低碳化工技术迅速发展。

参考文献

- [1] 全球能源互联网发展合作组织. 全球能源互联网研究与展望[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [2] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] 张臻烨, 胡山鹰, 金涌. 2060中国碳中和: 化石能源转向化石资源时代[J]. 现代化工, 2021, 41(6): 1-5.
ZHANG Zhenye, HU Shanying, JIN Yong. China achieving carbon neutral in 2060: fossil energy to fossil resource era[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(6): 1-5 (in Chinese).
- [4] 宁成浩. 化石能源从燃料向原料转变的战略构想[J]. 中国能源, 2013, 35(8): 6-8.
NING Chenghao. Strategic conception of transforming fossil energy from fuel to raw material[J]. Energy of China, 2013, 35(8): 6-8 (in Chinese).
- [5] 朱兵, 陈定江, 蒋萌, 等. 化学工程在低碳发展转型中的关键作用探讨: 从物质资源利用与碳排放关联的视角[J]. 化工学报, 2021, 72(12): 5893-5903.
ZHU Bing, CHEN Dingjiang, JIANG Meng, et al. Key role of chemical engineering in transition to low-carbon development in perspective of the linkage between resource utilization and carbon emissions[J]. CIESC Journal, 2021, 72(12): 5893-5903 (in Chinese).
- [6] SONG F L, MEHEDI H, LIANG C H, et al. Review of transition paths for coal-fired power plants[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 354-370.
- [7] OLIVIER J G, PETERS J A. CO₂ from non-energy use of fuels: a global, regional and national perspective based on the IPCC Tier 1 approach[J]. Resources, Conservation and

- Recycling, 2005, 45(3): 210-225.
- [8] NEELIS M L, PATEL M, GIELEN D J, et al. Modelling CO₂ emissions from non-energy use with the non-energy use emission accounting tables (NEAT) model[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2005, 45(3): 226-250.
- [9] WEISS M, NEELIS M, BLOK K, et al. Non-energy use of fossil fuels and resulting carbon dioxide emissions: bottom-up estimates for the world as a whole and for major developing countries[J]. Climatic Change, 2009, 95(3): 369-394.
- [10] PATEL M, NEELIS M, GIELEN D, et al. Carbon dioxide emissions from non-energy use of fossil fuels: summary of key issues and conclusions from the country analyses[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2005, 45(3): 195-209.
- [11] WEISS M, NEELIS M L, ZUIDBERG M C, et al. Applying bottom-up analysis to identify the system boundaries of non-energy use data in international energy statistics[J]. Energy, 2008, 33(11): 1609-1622.
- [12] MACKNICK J. Energy and CO₂ emission data uncertainties[J]. Carbon Management, 2011, 2(2): 189-205.
- [13] 庞凌云, 翁慧, 常靖, 等. 中国石化化工行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 356-367. PANG Lingyun, WENG Hui, CHANG Jing, et al. Pathway of carbon emission peak for China's petrochemical and chemical industries[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 356-367 (in Chinese).
- [14] 甘凤丽, 江霞, 常玉龙, 等. 石化行业碳中和技术路径探索[J]. 化工进展, 2022, 41(3): 1364-1375. GAN Fengli, JIANG Xia, CHANG Yulong, et al. Exploration of carbon neutral technology path in petrochemical industry[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(3): 1364-1375 (in Chinese).
- [15] 戴宝华. “双碳”目标约束下炼化产业转型发展思考[J]. 石油炼制与化工, 2021, 52(10): 25-30. DAI Baohua. Countermeasures of refining and petrochemical industry transformation development under the targets of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2021, 52(10): 25-30 (in Chinese).
- [16] 金雅宁, 倪正, 田喆, 等. 碳中和愿景目标对油气行业的挑战与机遇[J]. 石油化工技术与经济, 2021, 37(1): 1-6. JIN Yaning, NI Zheng, TIAN Zhe, et al. Challenges and opportunities of the carbon neutral vision and goals to the oil and gas industry[J]. Techno-Economics in Petrochemicals, 2021, 37(1): 1-6 (in Chinese).
- [17] DAIOGLOU V, FAAIJ A P C, SAYGIN D, et al. Energy demand and emissions of the non-energy sector[J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(2): 482-498.
- [18] International Energy Agency. Data and statistics. [EB/OL]. (2022-02-10). <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables/?country=WORLD&year=2017&energy=Balances>.
- [19] OLIVIER J G J, SCHURE K M, PETERS J. Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions[R]. Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2020.
- [20] 赵晓飞. 打造高端化学品, 接轨前沿新材料: 煤化工行业, 砥砺前行绿色未来[J]. 中国石油和化工, 2018(5): 28-29.
- [21] International Energy Agency. The future of petrochemicals[R]. Paris: IEA, 2018.
- [22] 吕晓东. 2015年世界及中国乙烯工业发展现状与2016年展望[J]. 当代石油石化, 2016, 24(4): 19-24. LÜ Xiaodong. A review of world and China's ethylene industry in 2015 and an outlook for 2016[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2016, 24(4): 19-24 (in Chinese).
- [23] 全球能源互联网发展合作组织. 全球碳中和之路[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [24] 汪飞, 龚丹丹, 郭慧, 等. 计及动态氢价和不确定性的区域综合能源系统规划-运行两阶段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 53-62. WANG Fei, GONG Dandan, GUO Hui, et al. Two-stage optimization of regional integrated energy system planning-operation with dynamic hydrogen pricing and uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 53-62 (in Chinese).
- [25] 赵海贺, 陈泽宇, 覃承富, 等. 车用燃料电池氢气循环系统引射特性研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 173-179. ZHAO Haihe, CHEN Zeyu, QIN Chengfu, et al. Ejection characteristics of hydrogen cycle system for vehicular fuel cell[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 173-179 (in Chinese).
- [26] BAZZANELLA A M, AUSFELDER F. Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry[R]. Brussels: The European Chemical Industry Council, 2017.
- [27] 韩红梅. 煤化工生产和消费过程的碳利用分析[J]. 煤化工, 2020, 48(1): 1-4. HAN Hongmei. Carbon utilization analysis of coal chemical production and consumption process[J]. Coal Chemical Industry, 2020, 48(1): 1-4 (in Chinese).
- [28] International Energy Agency. World energy outlook 2020[R]. Paris: IEA, 2020.
- [29] SAYGIN D, GIELEN D. Zero-emission pathway for the global chemical and petrochemical sector[J]. Energies, 2021, 14(13): 3772.

收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2022-10-27。



王利兵

作者简介:

王利兵(1986), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为能源电力系统规划与运行、电力市场。通信作者, E-mail: libing-wang@geidco.org。

张贇(1981), 男, 高级工程师, 研究方向为能源转型、电力市场、能源互联网等, E-mail: zhangyun@geidco.org。

郑炜(1992), 男, 高级工程师, 研究方向为能源转型政策与规划、全球能源互联网等, E-mail: weizheng1@geidco.org

文亚(1980), 男, 高级工程师, 研究方向为能源经济、环境金融、能源市场、全球能源互联网等, E-mail: ya-wen@geidco.org。

王皓界(1989), 男, 高级工程师, 研究方向为能源转型、新型电力系统、新型电气化等, E-mail: haojie-wang@geidco.org。

(责任编辑 翁宇威)