

引用格式:吴明,姜国强,贾冯睿,等.基于物质流和生命周期分析的石油行业碳排放[J].资源科学,2018,40(6):1287-1296.  
[Wu M, Jiang G Q, Jia F R, et al. Carbon emissions from the petroleum industry based on the analysis of material flow and life cycle [J]. Resources Science, 2018, 40(6):1287-1296.] DOI:10.18402/resci.2018.06.18

# 基于物质流和生命周期分析的石油行业碳排放

吴明<sup>1</sup>,姜国强<sup>1</sup>,贾冯睿<sup>1</sup>,刘广鑫<sup>1</sup>,岳强<sup>2</sup>

(1. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院,抚顺 113001; 2. 东北大学冶金学院,沈阳 110819)

**摘要:**国内关于石油生命周期内的碳排放的研究主要集中在石油制品的消费环节,不能真实地反映石油流动生命周期内的碳排放。为了探寻石油生命周期内真实碳排放以及未来发展趋势,本文结合了物质流分析(Material flow analysis, MFA)和生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)方法,建立了石油生命周期内碳元素流动模型。以国内某大型炼化企业为例,计算了各个环节的隐含碳排放和石油燃烧碳排放量,分析了影响隐含碳排放的关键影响因素,同时,设计了四种不同的情景,分别预测了2015—2050年间中国石油生命周期内的隐含碳排放发展和变化趋势。研究结果表明:①在石油生命周期内,每吨石油在生命周期总碳排放量约为670kg(约折合CO<sub>2</sub>排放量为2457kg),其中隐含碳占总碳排放量的23%;②开采环节和炼化环节隐含碳排放分别占隐含碳总量的46%和54%,其中开采环节主要隐含碳排放来自天然气消耗和电力的消耗,分别占总量的47%和30%,炼化环节的隐含碳排放主要来自焦炭燃烧,占总量的46%;③在消费环节中,汽油、柴油和煤油在交通运输业中的消耗量最大,分别占各自总量的42%、53%和80%。提高石油行业能源利用效率和优化能源消费结构是实现国家2030年碳排放达到峰值目标的有效途径。

**关键词:**炼化企业;石油行业;物质流分析;生命周期分析;碳流动;隐含碳排放;中国

DOI:10.18402/resci.2018.06.18

## 1 引言

石油是仅次于煤炭的第二大CO<sub>2</sub>排放源,2015年由石油产品消耗所产生的CO<sub>2</sub>排放约为5.8亿t,占全球CO<sub>2</sub>排放总量的13.1%<sup>[1]</sup>。此外,石油开采和炼化行业也集中了大量的能源消耗与CO<sub>2</sub>排放。据国家统计局统计,2015年石油开采和炼化行业能耗合计占全国工业总能耗的26.2%<sup>[2]</sup>。这些“隐含”在石油产品中的CO<sub>2</sub>排放已成为工业CO<sub>2</sub>排放中不可忽视的来源<sup>[3]</sup>。因此,针对石油流动生命周期内所“隐含”的CO<sub>2</sub>排放的研究,对国家温室气体减排具有重要的意义。

对于隐含碳排放问题,国内学者展开了系列的研究。雷震等使用投入产出模型,结合生命周期评估法(Life Cycle Assessment, LCA),对辽宁省各行

业的隐含碳排放进行了研究。石油加工、炼焦及核燃料加工业在各行业中的隐含碳排放量最大<sup>[4]</sup>。吴长燕等采用投入产出与生命周期评价法,对江苏省各行业直接和间接碳排放进行测算。构建碳减排潜力模型,模拟产业结构调整引起的减排潜力。结果表明,石油加工、炼焦及核燃料加工业造成的隐含碳排放占总体的前三位<sup>[5]</sup>。唐建荣等基于中国2007年地区经济投入产出表及其生命周期评价模型,从直接排放和隐性排放两个视角分析碳排放部门间的分布结构。结果表明,工业的隐含碳排放量最大,且其隐含排放量主要源自生产链中的电力、热力的生产和供应业<sup>[6]</sup>。

针对CO<sub>2</sub>排放的研究主要有生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)和物质流分析法(Ma-

收稿日期:2017-12-17;修订日期:2018-03-09

基金项目:国家自然科学基金项目(71373003);辽宁省教育厅高等学校科学研究一般项目(L2014146)。

作者简介:吴明,男,辽宁抚顺人,教授,博士生导师,主要研究方向为油气管道输送技术。E-mail: lnpu2015@163.com

通讯作者:刘广鑫, E-mail: liuguangxin5@126.com

terial Flow Analysis, MFA)两种方法<sup>[7]</sup>。LCA是一种对产品从原材料的开采、生产加工、包装、运输、消费以及回收和最终处理全部过程对资源和环境影响进行分析与评价的方法<sup>[8]</sup>。该方法源于美国在20世纪60年代末针对包装品的分析和评价<sup>[9]</sup>。生命周期评价作为环境评估的决策方法,在能源系统、废弃物管理、工艺设计、环境政策制定等领域得到了广泛的应用<sup>[10]</sup>。近年来,在评估石油行业的CO<sub>2</sub>排放相关领域也被大量的应用。AbdullahAl等对炼油厂供氢方案使用了LCA的方法进行了评估比较,发现由电网清洁能源动力为炼油厂供应电解氢被认为是提供石油燃料脱碳首选方案<sup>[11]</sup>。

此外,MFA作为一种追踪物质从自然界开采后进入经济系统、并流经该系统的各个环节,最终回到自然环境的全过程,以此来分析资源利用状况及其对环境造成的影响研究方法,在石油行业对CO<sub>2</sub>排放的研究应用也较为广泛<sup>[12-14]</sup>。Kuczenski等使用了MFA对加利福尼亚地区润滑油进行了回收利用的分析,发现大约62%的润滑油在生命结束时可以回收利用,从而也将降低对环境的CO<sub>2</sub>的排放<sup>[15]</sup>。Fang等应用了MFA对中国东北14个典型的矿业城市直接物质投入进行了计算和分析。结果表明,多资源型城市对于资源和环境产生的压力是最严重的<sup>[16]</sup>。在此基础上,Rajovic等人结合MFA和LCA两种方法,发现向油田引入有效的热电联产系统代替现有的燃烧技术和热发电技术将有效地降低油田的CO<sub>2</sub>的排放量<sup>[17]</sup>。

Zhao等构造了一个计量模型,探讨了中国的汽油需求弹性,然后对汽油消耗造成的CO<sub>2</sub>减排进行深入的研究,结果表明,在低油价时期,汽油需求弹性不高。但由于中国巨大的汽油需求量,调整税费仍然会影响汽油的消耗和CO<sub>2</sub>的排放量<sup>[18]</sup>。Alkhatlan等使用结构时间序列技术,对1971至2013年间沙特阿拉伯交通部门CO<sub>2</sub>的排放进行了分析,结果表明,碳排放的弹性相对于总的石油消费是积极和显著的<sup>[19]</sup>。Weng等建立了一种将MFA与能量流分析相结合的CO<sub>2</sub>排放评价方法,将该方法应用于中国某炼油厂,结果表明,联合MFA和能量流评价的CO<sub>2</sub>排放量仅比MFA评价的排放量高出14.40%左右<sup>[20]</sup>。

综上所述,现有的文献广泛关注于石油生命周期内的某一物质或产品在其生产、加工和消费过程中所产生的CO<sub>2</sub>排放问题,同时鲜有文献结合LCA和MFA方法进行研究。本文结合LCA和MFA方法,建立石油生命周期内碳流动模型,以国内某大型炼化企业为例,计算了石油从开采环节到炼化环节,最后到消费环节整个生命周期内石油燃烧碳排放和隐含碳排放量并分析了其影响因素,同时预测了中国石化行业隐含碳排放的趋势。以期为石化行业的节能减排提供一定的理论依据。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究对象与系统边界

图1为石油流动生命周期系统边界以及物质流动的全过程。该系统边界为石油生命周期的地理边界,分为原油开采、原油炼化和产品消费三个环节,其中原油炼化环节根据炼化企业加工工艺又可以进一步划分为三个子环节,分别为一次加工、二次加工和三次加工。本文的研究对象为原油中和石油制品中的碳元素以及与在各环节中所消耗能源所等价的碳元素,其中原油主要来自大庆、吉林和辽河三大油田。

### 2.2 流动方式

如图1所示,石油在其生命周期内流动可被划分为开采、炼化和消费三个环节。总输入端来源于油田开采的原油,其中大部分经由管道、铁路、船舶等运输方式运至石油炼化企业,将其转化为石油燃料和化工原材料以供应国民经济各行业消费使用,石油燃料部分则经燃烧后排放进入自然界。石油中碳流动和生产环节能量的流动贯穿于石油生命周期的始终,输入端和输出端差值为石油存储量与损耗量之和。碳排放过程分为石油燃烧碳排放和隐含碳排放两种。石油燃烧碳排放指的是炼化企业生产出的成品油消费后造成的碳排放。隐含碳排放又分为直接碳排放和间接碳排放。直接碳排放指在本文中指的是煤炭,天然气等化石燃料燃烧造成的碳排放,间接碳排放是指是在各个环节中消耗的电力、蒸汽和热力(非化石燃料)造成的碳排放<sup>[21]</sup>。下面将对三个环节内的物质流动和能量流动进行详细阐述:

(1)开采环节的碳流动分为隐含碳流动和石油

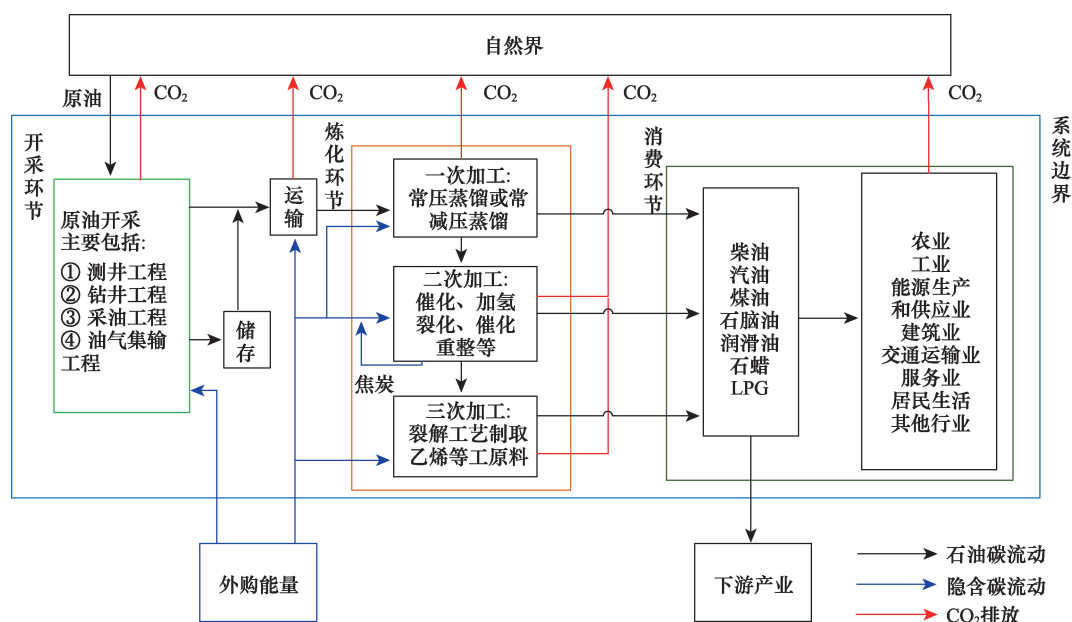


图1 石油生命周期内物质流动

Figure 1 Material flow in the whole life cycle of petroleum

中碳元素的流动。石油中的碳元素随着自然界的原油被开采进入该系统中,一部分原油被直接运送到炼化企业中进行加工,另一部分则被用于国家石油战略储备或短期周转储备。同时,原油开采需要消耗大量的能源物质,例如电力,天然气和煤炭。这些能源物质的消耗间接或者直接地造成了隐含碳流动(或者叫隐含碳排放),即为图1中的外购能源。

(2)炼化环节炼化企业对原油的加工分为一次加工、二次加工和三次加工<sup>[22]</sup>。一次加工主要将原油进行蒸馏,把原油蒸馏分为几个不同的沸点范围(分馏),将一次加工得到的馏分再加工成商品油叫二次加工,将二次加工得到的商品油制取基本有机化工原料的工艺叫三次加工。一次加工装置,常压蒸馏或常减压蒸馏。二次加工装置:催化、加氢裂化、延迟焦化、催化重整、烷基化、加氢精制等。三次加工装置:裂解工艺制取乙烯、芳烃等化工原料。

炼化环节的碳流动也分为隐含碳流动和石油中的碳元素流动。石油中的碳元素从开采环节随着原油经管线或铁路被输送到炼化企业。在炼化企业中原油中的碳元素经过三次加工被储存石油制品中,随着石油制品进入到消费环节中。由图1可知三次加工环节中除石油中的碳元素流动外同时消耗大量的能量,从而造成了隐含碳流动<sup>[23]</sup>。尽

管石油焦中的碳元素来自原油,但在二次加工中产生的石油焦被用作燃料使用,因此在本文中作为能源物质,被计算在隐含碳流动中。

(3)消费环节石油中的碳元素随石油制品被输送到各个行业中,主要集中在农业(农、林、牧、渔业)、工业、能源生产供应业(电力、燃气及水的生产和供应业)、建筑业、交通运输业(交通运输储运业和邮政业)、服务业(批发、零售业和住宿、餐饮业)、居民生活七个领域。随着石油产品的消耗使用,其中的碳元素最终以CO<sub>2</sub>的形式排放到自然界中。

### 2.3 数据的统计与整理

本文数据源于两部分,一部分来自实地调研,另一部分则通关查阅相关资料获得。炼厂2015年各个环节的进出口参数以及炼化过程消耗的能源物质量,二者均来自于对该炼厂实地调研;原油开采环节消耗的能源物质量摘录于《中国统计年鉴2016》<sup>[21]</sup>;净发热值和碳排放因子摘录于《2006年IPCC国家温室气体清单指南》<sup>[24]</sup>;折标煤系数摘录于《综合能耗计算通则(GB/T 2589—2008)》<sup>[25]</sup>;国家制定的炼厂能耗系数来源于《炼油单位产品能耗限额(GB/T 30251—2013)》<sup>[26]</sup>;电力隐含碳折算系数来源于《2016年中国区域电网基准线排放因子》<sup>[27]</sup>。

本文计算过程参考《中国石油化工企业温室气体



排放核算方法与报告指南》<sup>[28]</sup>,主要计算公式如下:

$$C_t = C_e + C_r + C_c \quad (1)$$

$$C_e = \sum_i \sum_j n_i a_i M_{ji} = \alpha M_e \quad (2)$$

$$C_r = \sum_j \sum_i n_i a_i M_{ji} = \beta M_r \quad (3)$$

$$C_c = \sum_s \sum_i n_i a_i M_{si} \quad (4)$$

$$c_p = (EF_{grid,OM,y} + EF_{grid,BM,y})/2 \quad (5)$$

$$c_s = P_s \times H_s \times S_h \quad (6)$$

式中  $C_t$  为生命周期内碳排放总量;  $C_e$  为开采环节碳排放总量;  $C_r$  为炼化环节碳排放总量;  $C_c$  为消费环节碳排放总量;  $n_i$  为第  $i$  种物质的净发热值;  $a_i$  为第  $i$  种物质的含碳量系数;  $\alpha$  为开采环节隐含碳排放系数;  $\beta$  为炼化环节隐含碳排放系数;  $M_{ji}$  为第  $j$  种油田开采过程中第  $i$  种物质或能量的数量;  $M_{ji}$  为第  $j$  种炼化阶段中第  $i$  种物质或能量的数量;  $M_{si}$  为第  $s$  种消费过程中第  $i$  种物质的数量;  $M_e$  和  $M_r$  分别为开采环节石油质量和炼化环节石油的质量;  $c_p$  和  $c_s$  分别为电力和蒸汽的隐含碳折算系数;  $EF_{grid,OM,y}$  和  $EF_{grid,BM,y}$  分别为容量边际排放因子和电量边际排放因子的加权平均值,取 0.4315 和 1.1291;  $P_s$  为蒸汽的实物量;  $H_s$  为蒸汽的热焓值;  $S_h$  为热力的折标煤系数。

公式(1)计算整个生命周期内的碳排放量,公式(2),公式(3)和公式(4)分别计算了原油开采,炼化和消费环节的碳排放量。公式(5)和公式(6)则分别计算了电力和热力消耗所造成的碳排放量。相关计算系数见表1。

## 2.4 情景设置

本文针对石油生命周期内隐含碳排放目标设定了不同隐含碳排放系数增长率,表2和表3分别为各种情景状况下开采环节隐含碳排放系数增长率和炼化环节隐含碳排放系数增长率。具体情景设置如下。

情景1: 在现有的政策方针下,考虑到当前的减排措施,不采用新的措施,开采环节和炼化环节隐含碳排放系数都维持稳定不变。

情景2: 在情景1的基础上优化能源结构,降低碳排放。因此将开采环节和炼化环节隐含碳排放系数从2015年分别每5年降低2.5%和3%。

情景3: 在情景2的基础上考虑可持续发展,进

表1 各种能源物质碳排放计算相关系数

Table 1 Carbon emission correlation coefficient of different energy materials

能源类型	折标准煤系数 /(kgec/kg)	净发热量 /(TJ/Gg)	碳排放因子 /(kg/GJ)	碳排放系数 /(kgC/kg)
原油	1.428 6	41.816 6	20.0	0.836 3
汽油	1.471 4	43.069 3	19.1	0.822 6
煤油	1.471 4	43.069 3	19.6	0.844 2
柴油	1.457 1	42.650 8	20.2	0.861 5
液化石油气	1.714 3	50.179 3	17.2	0.863 1
其他石油制品	1.200 0	35.125 2	20.0	0.702 5
3.5MPa 蒸汽	0.125 7	3.679 4	—	—
1.0MPa 蒸汽	0.108 6	3.178 8	—	—
燃料油	1.428 6	41.816 6	21.1	0.882 3
凝结水	0.010 9	0.319 1	—	—

注:(1)净发热量和碳排放因子摘录于《2006年IPCC国家温室气体清单指南》<sup>[24]</sup>; (2)折标煤系数源摘录自2008年6月1日正式实施的最新国家标准GB/T 2598—2008《综合能耗计算通则》<sup>[25]</sup>。

表2 2015—2050年间不同时间段石油开采环节隐含碳排放系数增长率

Table 2 Embodied carbon emission coefficient growth rate in mining process at different time periods from 2015 to 2050 (%)

	2015— 2020年	2020— 2025年	2025— 2030年	2030— 2035年	2035— 2040年	2040— 2045年	2045— 2050年
情景1	0	0	0	0	0	0	0
情景2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
情景3	5	5	5	5	5	5	5
情景4	10	10	10	10	10	10	10

表3 2015—2050年间不同时间段石油炼化环节隐含碳排放系数增长率

Table 3 Embodied carbon emission coefficient growth rate in refining process at different time periods from 2015 to 2050 (%)

	2015— 2020年	2020— 2025年	2025— 2030年	2030— 2035年	2035— 2040年	2040— 2045年	2045— 2050年
情景1	0	0	0	0	0	0	0
情景2	3	3	3	3	3	3	3
情景3	6	6	6	6	6	6	6
情景4	9	9	9	9	9	9	9

一步优化能源结构,大力发展节能设备制造业、核电产业,可再生能源产业,为完成“十三五”提出的2020年碳排放强度在2005年基础上下降40%~45%,在2030年碳排放达到峰值的目标,将炼化环节和开采环节的隐含碳排放系数分别设定为每5年降低5%和6%。

情景4:依据国际能源组织(International Energy Organization, IEA)的450情景,该情景设定的目标是将大气层中的温室气体浓度控制在450ppm- $\text{CO}_2$ 当量,以实现把全球温度上升限制在 $2^\circ\text{C}$ 的目标。为实现此目标,石油生命周期内隐含碳排放需进一步下调,本文将炼化环节和开采环节的隐含碳排放系数分别设定为每5年降低10%和9%。

### 3 结果及分析

本节以国内某大型炼化企业为例,对石油生命周期内的物质流动和碳排放的过程进行分析和讨论。同时建立四种情景模式对中国石油行业的隐含碳排放进行预测分析,提出了减排的建议和方法。

#### 3.1 物质流动

图2详细地展示了石油生命周期内石油中碳元素流动方向和数量。石油中碳元素流动主要经过三个环节,分别为开采环节、炼化环节和消费环节。原油中的碳元素首先随着原油经过开采环节进入炼化企业,经过加工环节进入到成品中,然后又伴随着成品油在消费环节进入各个行业,最终在排放环节变成废气排放到自然界中。下面将详细介绍三个环节中的物质流动(石油中碳元素流动)。

在开采环节中,输入端石油中碳输入总量为583.7万t。其中85%来源于大庆油田,占大庆油田2015年石油产量的14%。该企业是全国最大的大庆原油加工基地。石油运输过程中大庆原油和吉林原油都经庆铁四线和铁抚线运输到该炼化企业,辽河原油则经沈抚线运送到该炼化企业。

在炼化环节中,炼化企业主要产品为汽油、柴油和煤油,约占总产品的74%,余下产品为润滑油,石脑油,石蜡和少量化工原料。一次加工中,成品油主要是汽油、柴油和煤油,约占炼化企业生产总产品的43%,余下的碱渣和蜡油进入二次加工。二次加工中,产品主要有汽油、煤油、柴油、润滑油和石脑油。其中汽油、柴油和煤油占炼化企业总产品的30%,余下的加氢白蜡、脱油蜡和一些化工原料进入三次加工。三次加工中,产品为润滑油和其他化工原料。

由表4可知在消费环节中,该炼化企业在2015年生产汽油117.1万t、柴油171.2万t、煤油89.2万t。其中,汽油主要用于交通运输业以及城镇居民生活,分别占总量的42%和21%;煤油主要用于交通运输业,约占其总量的80%;柴油主要用于交通运输业,约占其总量的53%。

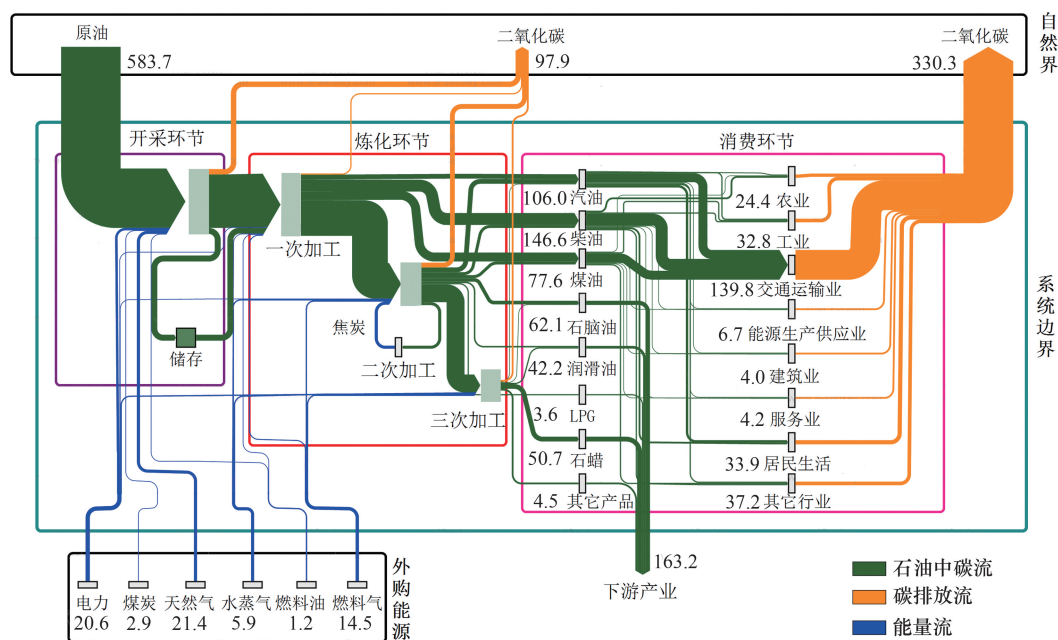


图2 2015年某炼化企业石油中碳和隐含碳流动

Figure 2 The carbon of petroleum flow and embodied carbon flow in a refinery in 2015

注:图中数字代表对应物质(行业)的含碳量或碳排放量,其中碳排放量均用斜体数字表示,数字单位均为万t。

表4 成品油在2015年各行业消费量

Table 4 Consumption of refined petroleum in various industries of 2015 (万t)

行业类别	汽油	煤油	柴油
农业	9.51	0.10	14.87
工业	8.98	13.49	23.86
能源生产供应业	0.45	0.12	0.73
建筑业	0.12	2.09	3.85
交通运输业	49.03	71.80	90.76
服务业	2.67	0.30	1.54
其他行业	21.67	1.24	26.12
居民生活	24.64	0.06	9.36
总计	117.07	89.20	171.09

注:表中数据为炼厂实地调研经计算整理后获得。

### 3.2 隐含碳流动

石油生命周期内的隐含碳流动来自原油开采环节和原油炼化环节。隐含碳流动来自外购能量,如图2所示,外界能量主要包括电力、蒸汽、燃料气、燃料油和煤炭等。在开采环节中,隐含碳的流动主要集中在天然气和电力消耗上:天然气的碳流动量为每年31.1万t,电力约为每年14.5万t。大庆原油的特征高蜡低硫,高镍低钒是陆相原油常见的特征。原油50℃时粘度为10~40厘泊,地下原油的粘度为5~10厘泊,因此开采所需能量消耗相比全国油田原油开采能量消耗较高<sup>[29]</sup>。在炼化环节中,隐含碳流动主要集中在焦炭、燃料气和电力:焦炭大约为每年24.0万t,燃料气为每年14.4万t,电力大约为每年7.1万t。

### 3.3 石油生命周期碳排放

石油生命周期碳排放分为石油燃烧碳排放和隐含碳排放。本节主要针对石油燃烧碳排放的源头(成品油在各行业消费量)以及隐含碳排放的源头(各能源消费量)进行了详细的定量分析并剖析了其影响因素。需要注意的是,在石油燃烧碳排放过程中,本文仅核算了成品油(包含:汽油、柴油和煤油)燃烧过程中所产生的碳排放,其他产品认为没有造成碳排放,例如润滑油、硬蜡、烃化油和其他产品。

该炼化企业的成品油主要以汽油、柴油和煤油为主,分别占炼化企业产品总量的24%、33%和17%。原油中的碳元素主要通过三种油品的燃烧形

成废气排放到自然界中,因此本文主要对该三种油中碳元素的流动进行了研究和分析。

由图3可知,该炼化企业生产的汽油在交通运输业的碳排放量占比为42%,居第一位。居民生活占总碳排放量21%,居第二位。煤油在交通运输业的碳排放量占比为80%,在制造业的碳排放量占比为13%。柴油在交通运输业的碳排放量占比为53%。由此可见,成品油燃烧碳排放主要集中在交通运输业。随着中国的汽车保有量近年来急剧增加,电动汽车的技术尚不成熟,汽柴油车仍然是交通运输业的主要方式。因此,对成品油的消耗也日益加剧,造成大量的碳排放<sup>[30]</sup>。所以对交通运输业进行优化改进将会有有效的减少碳排放量。

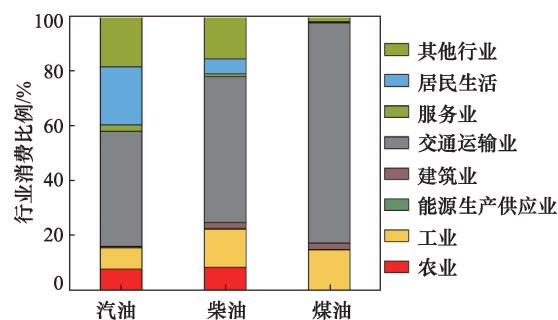


图3 2015年成品油各行业的消费比例

Figure 3 Consumption ratio of refined petroleum in various industries in 2015

1t原油的生命周期内产生的隐含碳排放量为153.2kg,占生命周期碳排放的23%,因此降低隐含碳排放对于碳减排具有重要的意义。石油生命周期内的隐含碳排放主要有焦炭燃烧、电力消耗和天然气消耗所产生,他们分别占总隐含碳排放的25%、21%和22%。所以对三者造成的隐含碳排放过程进行优化将起到至关重要的作用。

下面将对石油开采环节和石油炼化环节中的隐含碳排放进行详细的谈论和研究。

由图4可知,在原油开采环节,天然气消耗造成的隐含碳排放占开采隐含碳排放的47%,居第一位。电力和原油消耗造成的隐含碳排放分别占30%和17%,分列第二和第三位。在原油炼化环节,焦炭燃烧造成的隐含碳排放占总量的46%,居第一位;燃料气消耗造成的隐含碳排放占27%,居第二位;电力和蒸汽造成的隐含碳排放比例分别为13%和11%。本文的电力供应主要来自东北电网,由于



2018年6月

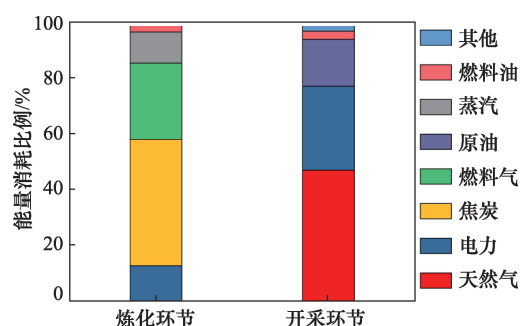


图4 开采和炼化环节隐含碳排放

Figure 4 Carbon emissions from mining and refining processes

以火力发电为主,所以其造成的碳排放较多。因此,使用清洁的能源发电,例如太阳能发电、水利发电或风能发电,会有效的减少隐含碳的排放<sup>[31]</sup>。其次,由于原油成分复杂,在没有进行加工的情况下作为燃料燃烧会造成大量碳排放。因此,在开采环节减少原油作为能源物质的使用有助于减少隐含碳排放。炼化环节中的主要碳排放来源于焦炭燃烧,因此,对焦炭燃烧装置进行改良,提高其能量转化效率会大幅减少隐含碳排放。

### 3.4 情景分析

本文研究的炼化企业为中国典型大型炼化企业,原油一、二次加工能力均为每年1000万t,生产原料主要为大庆原油、吉林原油和辽河(沈北)原油,建国以来该企业累计加工原油3.34亿t。其能源消耗和原油加工量均能代表中国炼化企业的平均水平,具有代表性,因此以该炼化企业为基础对中国石油行业的隐含碳排放进行了预测分析。

从图5中得出四种情景碳排放量均表现为先增加后减小的趋势。在情景1中,从2015—2050年的隐含碳排放逐渐递增,增长速率逐年放缓。在情景2

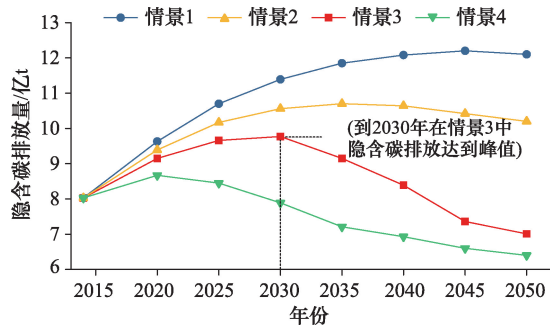


图5 2015—2050年中国石油行业隐含碳排放量

Figure 5 Embodied carbon emissions in China's petroleum industry from 2015 to 2050

中,从2015—2035年隐含碳排放逐年递增,在2035年达到最大值,从2035—2050年稍有下降的趋势。在情景3中,隐含碳排放从2015—2030年呈递增趋势,在2030年达到峰值,从2030年以后开始降低。与情景2相比,隐含碳排放的增长阶段速率相对较低,排放的峰值也相对较低。在情景3中,隐含碳排放从2030年就达到了峰值,随后一直到2040年逐年递减,相比于其他三种情景,该情景的隐含碳排放的峰值出现的最早,峰值也是最小。中国向联合国气候变化框架公约秘书处提交的中国国家自主决定贡献文件中明确提出于2030年左右CO<sub>2</sub>排放达到峰值。通过情景1和情景2发现如果维持现有的政策和技术或者仅仅进一步的优化能源结构是实现不了2030年的减排目标的。四种情景中只有情景3和情景4能够实现目标,所以原油开采环节和原油炼化环节的隐含碳排放系数须每5年分别降低5%和6%以上。这就需要对原油开采技术和原油炼化技术进行优化改进,同时也要大力发展风电、水电等清洁能源,降低化石燃料燃烧过程中的CO<sub>2</sub>排放,尤其是提高发电技术,促使化石燃料向低碳方向发展,逐渐降低高碳产业在整个国民经济中的比重。针对原油开采和炼化环节的相关优化技术见表5。

案例中石化企业加工的原油全部为中国自产原油,据国家能源局统计,2015年中国石油开采业总能耗为3192.3万tec,而石油产量为15.0亿t,全国平均开采1t原油造成的碳排放约为90.7kg(即全国原油开采碳排放系数为90.7kg/t)<sup>[2]</sup>。案例开采1t原油造成的碳排放为109.0kg(本文中原油开采碳排放系数为109.0kg/t),高于全国平均水平。主要因为大庆原油含蜡高、粘度大,加之该地区处于中国北方地区,气温较低,因而开采需要消耗较多能源,从而造成较多的隐含碳排放。根据《炼油单位产品能耗限额(GB 30251—2013)》<sup>[26]</sup>规定,现有炼油企业加工1t原油能耗限制为112.0kg(即炼化碳排放系数为112.0kg/t)。案例中炼厂加工1t原油造成碳排放为44.1kg(即炼厂碳排放系数为44.1kg/t),低于国家规定数值。四种情景中原油开采碳排放系数到2030年将分别达到109.0kg/t、99.4kg/t、93.4kg/t、79.0kg/t,只有情景4状况下碳排放系数将低于国家平均水

表5 石油行业优化技术总结

Table 5 Summary of optimization technology in petroleum industry

优化技术		备注
开采环节	聚合物驱油技术	适合聚合物驱的条件通常是油层温度在45~70℃,地层水矿化度为(1 603~30 435)mg/L,其中二价阳离子质量浓度为(7~738)mg/L。原油黏度为10~100mPa·s时,聚合物驱油采收率提高幅度较大。一般来说,聚合物驱油技术适用于非均质砂岩油田。
	三元复合体系驱油技术	三元复合体系驱油是指在注入水中加入低浓度的表面活性剂、碱和聚合物的复合体系驱油的一种提高原油采收率的方法。矿场试验表明,三元复合驱油技术可比水驱油技术提高20%以上的原油采收率。
炼化环节	板式空冷技术	适用于催化裂化、气体分馏、常减压蒸馏等多套装置,尤其适用于设备使用时间较长,设备落后老化,系统压降较大的情况。与湿冷、空冷相比,该技术可降低电耗量65%左右,同时降低软化水耗量近90%,是技术水平处于国内领先地位的专利技术。
	装置间热联合与热供料技术	适用于炼化企业的上下游两套装置(比如催化裂化和气体分离装置),或者多套装置作为一个整体(比如在常减压、催化、加氢、延迟焦化、溶脱装置之间实行热联合和热供料)。炼油装置热联合及热供料投用后,实际降低炼油能耗1.85kgec/t。

平。因此对于原油开采技术进行改良优化对于降低开采碳排放系数起到至关重要的作用,大庆油田为非均质砂岩油田,适宜使用聚合物驱油技术。同时,三元复合体系驱油技术对于大庆原油的开采也是较为适用的。根据矿场试验表明,三元复合驱可比水驱提高20%以上的原油采收率<sup>[32]</sup>。

4 结论与讨论

本文以炼化企业为核心,结合了MFA和LCA方法,研究了石油生命周期内碳排放过程。将石油生命周期分开采、炼化、消费三个环节。分别计算了各个环节的碳排放和隐含碳排放量,对结果进行了分析和讨论。研究结果如下:

(1)1t原油生命周期的碳排放量为670kg(约折合2457kg CO<sub>2</sub>),其中隐含碳排放量占总碳排放量的23%,炼化企业加工的燃料油消费所引起的碳排放占77%。隐含碳排放主要来自焦炭燃烧、天然气燃烧和所使用的电力的发电过程,分别占总量的25%、22%和21%。

(2)隐含碳排放来自原油开采和炼化企业炼化两个部分。在开采环节中,主要隐含碳排放来自天然气消耗和电力的消耗,分别占总量的47%和30%。东北地区的电力以火电为主,电力消耗所造成的隐含碳排放较国家平均水平高,因此,改用清洁能源来发电会大幅减少开采环节的隐含碳排放。炼化环节焦炭燃烧造成的隐含碳排放占46%,居第一位,因此,提高焦炭的能量利用率会大幅降低炼化环节的隐含碳排放。

(3)石油生命周期中的碳排放主要来自炼化企业加工成品油的燃烧。汽油、柴油和煤油在交通运输业中的消耗量最大,分别占各自总量的42%、53%和80%。这主要是由于中国汽车保有量日益增多,物流行业的快速发展造成了成品油需求量大幅增加<sup>[33]</sup>。因此,提高消费源头能量利用效率以及倡导清洁能源作为动力燃料,会对减排产生重要作用。

(4)情景分析结果表明,为了实现2030年碳排放减排目标,石油生命周期内原油开采环节和原油炼化环节中的隐含碳排放系数应每5年的降低速率应分别大于5%和6%。因此应大力发展风电、水电等清洁能源,改善炼化企业的原油加工技术和原油开采技术,减少化石燃料的燃烧,走出一条中国特色“清洁能源”之路。

参考文献(References):

[1] BP Group. Statistical Review of World Energy [EB/OL]. (2017-06-01) [2017- 11- 07]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/co2-emissions.html>.  
[2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016. ]  
[3] Yu X, Xu M, Ding Y. Carbon emissions of China's industrial sectors based on input-output analysis[J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2017, (2): 147-157.  
[4] 雷震. 辽宁省行业隐含碳排放测算和碳减排潜力分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2017. [Lei Z. Measuring Embodied Carbon Emission and Analyzing Emission Reduction Potential for Industries of Liaoning Province[D]. Dalian: Dalian University of Tech-



2018年6月

- nology, 2017. ]
- [5] 吴常艳, 黄贤金, 揣小伟, 等. 基于EIO-LCA的江苏省产业结构调整与碳减排潜力分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(4): 43-51. [Wu C Y, Huang X J, Chuai X W, et al. Analysis of industrial structure adjustment and carbon reduction potential in Jiangsu Province: based on EIO-LCA model[J]. *China Population Resources and Environment*, 2015, 25(4): 43-51. ]
- [6] 唐建荣, 李焯熹. 基于EIO-LCA的隐性碳排放估算及地区差异化研究-江浙沪地区隐含碳排放构成与差异[J]. 工业技术经济, 2013, (4): 125-135. [Tang J R, Li Y X. Study on the differentiation of regional implicit carbon emissions based on EIO-LCA-composition and differences of implicit carbon emission in Yangtze River Delta[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2013, (4): 125-135. ]
- [7] 王少剑, 刘艳艳, 方创琳. 能源消费CO<sub>2</sub>排放研究综述[J]. 地理科学进展, 2015, 34(2): 151-164. [Wang S J, Liu Y Y, Fang C L. Review of energy-related CO<sub>2</sub> emission in response to climate change [J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(2): 151-164. ]
- [8] Guinée J B, Heijungs R, Huppes G, et al. Life cycle assessment: Past, present, and future[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(1): 90-96.
- [9] 杨建新, 王如松. 生命周期评价的回顾与展望[J]. 环境科学进展, 1998, (2): 21-28. [Yang J X, Wang S R. Retrospect and prospect of life cycle assessment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 1998, (2): 21-28. ]
- [10] 黄春林, 张建强, 沈淦涛. 生命周期评价综述[J]. 环境技术, 2004, 22(1): 29-32. [Huang C L, Zhang J Q, Sheng S T. Summarize of life cycle assessment[J]. *Environmental Technology*, 2004, 22(1): 29-32. ]
- [11] Al-Subaie A, Maroufmashat A, Elkamel A, et al. Presenting the implementation of power-to-gas to an oil refinery as a way to reduce carbon intensity of petroleum fuels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(30): 19376-19388.
- [12] Brunner P H, Rechberger H. Practical handbook of material flow analysis[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2004, 9(5): 337-338.
- [13] Fischer-Kowalski M, Krausmann F, Giljum S, et al. Methodology and indicators of economy-wide material flow accounting[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2011, 15(6): 855-876.
- [14] Sendra C, Gabarrell X, Vicent T. Material flow analysis adapted to an industrial area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(17): 1706-1715.
- [15] Kuczenski B, Geyer R, Zink T, et al. Material flow analysis of lubricating oil use in California[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2014, 93: 59-66.
- [16] Fang D, Li T, Zhang H, et al. Decomposition analysis on direct material input and dematerialization of mining cities in Northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2009, 19(2): 104-112.
- [17] Rajović V, Kiss F, Maravić N, et al. Environmental flows and life cycle assessment of associated petroleum gas utilization via combined heat and power plants and heat boilers at oil fields[J]. *Energy Conversion & Management*, 2016, 118: 96-104.
- [18] Zhao L T, He L Y, Cheng L, et al. The effect of gasoline consumption tax on consumption and carbon emissions during a period of low oil prices[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171: 1429-1436.
- [19] Alkhathlan K, Javid M. Carbon emissions and oil consumption in Saudi Arabia[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 48: 105-111.
- [20] Weng Y, Yan G, Li Y, et al. Integrated substance and energy flow analysis towards CO<sub>2</sub> emission evaluation of gasoline & diesel production in Chinese fuel-refinery[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 112: 4107-4113.
- [21] Steubing B, Böni H, Schluep M, et al. Assessing computer waste generation in Chile using material flow analysis[J]. *Waste Management*, 2010, 30(3): 473-482.
- [22] 陈长生. 石油加工生产技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. [Chen C S. Petroleum Processing Technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. ]
- [23] 侯英生. 中国炼油技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2011. [Hou F S. Petroleum Refining Technology in China[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2008. ]
- [24] Lanza R, Martinsen T, Mohammad A K W, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Tokyo: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [25] 国家标准化管理委员会. GB/T 2589-2008 综合能耗计算通则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 2589-2008 General Principles for Calculation of the Comprehensive Energy Consumption[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. ]
- [26] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. GB/T 30251-2013 炼油单位产品能耗限额[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. [National Development and Reform Commission. GB/T 30251-2013 the Norm of Energy Consumption Per Unit Product for Petroleum Refining [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. ]
- [27] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2016年中国区域电网基准线排放因子[EB/OL]. (2017-04-14)[2017-11-07]. [http://www.ndrc.gov.cn/yjzq/201704/t20170414\\_847850.html](http://www.ndrc.gov.cn/yjzq/201704/t20170414_847850.html). [National Development and Reform Commission. China's regional grid base line emission factors in 2016[EB/OL]. (2017-04-14)[2017-11-07]. [http://www.ndrc.gov.cn/yjzq/201704/t20170414\\_847850.html](http://www.ndrc.gov.cn/yjzq/201704/t20170414_847850.html). ]
- [28] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国石油化工企业温室气体排放核算方法与报告指南[EB/OL]. (2014-12-03)[2017-11-07] [http://bgtd.ndrc.gov.cn/zcfb/201502/t20150209\\_663602.html](http://bgtd.ndrc.gov.cn/zcfb/201502/t20150209_663602.html). [National Development and Reform Commission. Accounting Method and Report Guide for Greenhouse Gas Emissions of Chi-

- nese Petrochemical Enterprises [EB/OL]. (2014-11-03)[2017-11-07]. [http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201502/t20150209\\_663602.html](http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201502/t20150209_663602.html). ]
- [29] 陆婉珍, 张寿增. 我国原油组成的特点[J]. 石油学报, 1980, 1(1): 92-105. [Lu W Z, Zhang S Z. The characteristics of the composition of crude petroleum in China[J]. *China Petroleum Processing Petrochemical Technology*, 1980, 1(1): 92-105. ]
- [30] 陈修禹. 汽车发动机的现状及发展趋势[J]. 科技资讯, 2016, 14(3): 58-59. [Chen X Y. Current situation and development trend of automobile engine[J]. *Science & Technology Information*, 2016, 14(3): 58-59. ]
- [31] 董忠博. 东北电力生产系统运作效率研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016. [Dong Z B. Research on Operating Efficiency Analysis of Northeast Electric Power Production Industry[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. ]
- [32] 程杰成, 廖广志, 杨振宇, 等. 大庆油田三元复合驱矿场试验综述[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(2): 46-49. [Cheng J C, Li Q, Liao K Z, et al. Pilot test of ASP flooding in Daqing oil field[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2001, 20(2): 46-49. ]
- [33] 黄福华, 刘长石. 国内物流产业发展理论研究现状与趋势[J]. 经济动态, 2009, (10): 74-76. [Huang F H, Liu C S. The current situation and trend of the research on the development of domestic logistics industry[J]. *Economic Perspectives*, 2009, (10): 74-76. ]

## Carbon emissions from the petroleum industry based on the analysis of material flow and life cycle

WU Ming<sup>1</sup>, JIANG Guoqiang<sup>1</sup>, JIA Fengrui<sup>1</sup>, LIU Guangxin<sup>1</sup>, YUE Qiang<sup>2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** Research in China on carbon emissions throughout the petroleum life cycle has mainly focused on the consumption of petroleum products, which cannot truly reflect carbon emissions. In order to explore development trends of carbon emissions in the petroleum life cycle, we establish the carbon flow model throughout the petroleum life cycle combining material flow analysis (MFA) and life cycle assessment (LCA). Taking a large-scale domestic refining and petrochemical enterprise as an example, hidden carbon emissions and carbon emissions from petroleum combustion are calculated, and factors influencing embodied carbon emissions are analyzed. Four scenarios were developed to predict the hidden carbon emission trend for China's petroleum sectors from 2015-2050. The results show that the total carbon emission per ton of oil is about 670 kg (equal to CO<sub>2</sub> emission of 2457 kg) in the petroleum life cycle, of which hidden carbon accounts for 23% of total carbon emissions. Exploitation and refining processes account for 46% and 54% of the total hidden carbon, respectively. In the exploitation processes, embodied carbon emissions mainly come from natural gas consumption and electricity consumption, accounting for 47% and 30% of the total, respectively. The embodied carbon emissions of refining processes are mainly from coke combustion, accounting for 46% of the total. In the consumption processes, the consumption of gasoline, diesel and kerosene in the transportation industry is the largest, accounting for 42%, 53% and 80% of the total, respectively. Improving the energy efficiency of the petroleum sector and optimizing energy consumption structure is an effective way to achieve a national carbon emission peak by 2030.

**Key word:** refining and chemical enterprises; petroleum industry; material flow analysis; life cycle assessment; carbon flow; embodied carbon emission; China