

基于生命周期评价 LCA 的煤制油生产过程分析

朱 玲¹,冯相昭²,孔佳雯¹

(1. 北京石油化工学院 环境工程系,北京 102617;2. 中华人民共和国生态环境部 环境与经济政策研究中心 气候变化政策研究部中心,北京 100029)

摘 要:基于某煤化工企业的现场调研和台账数据,运用生命周期评价(LCA)的基本方法,对煤炭开采加工过程、运输过程,煤制油过程等主要环节中能源消耗和污染物排量进行统计分析,并进行环境影响识别,分析整个过程中的主要污染环节和主要污染物,旨在保证能源安全和清洁利用能源的前提下,促进煤化工行业低碳绿色发展。计算结果发现:生产 1 t 煤基油,气态污染物排放总量为 16.56 t,其中 CO₂ 占总排放量的 98.03%,主要来自工厂加工中 C/H 原子比的调整释放和能源动力过程煤炭燃烧排放,二者分别占 53.9% 和 25.87%。温室气体排放量约为 16.23 t(按 CO₂ 计算),酸化气体量为 33.847 kg(折合成 SO₂),富营养化成分为 30.483 kg(折合成 PO₄),产生的光化学烟雾的量为 2.651 3 kg(折合成 C₂H₄),粉尘量为 0.834 kg。废水排放总量为 8.204 4 t/t(以油计),68.74% 来自生产过程。

关键词:煤制油;生命周期评价;污染排放;能源消耗;温室气体

中图分类号:X701

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2018)02-0119-08

Analysis on production process of coal to oil with life cycle assessment

ZHU Ling¹, FENG Xiangzhao², KONG Jiawen¹

(1. Department of Environmental Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. Division of Climate Change Policy Research, Policy Research Centre for Environment and Economy, MEP, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the spot investigations and annual report statistics of a coal chemical factory, the total energy consumption and pollutants discharge of the entire process were calculated and analyzed by LCA methods, including the coal mining process, transportation process and coal to oil process. In order to promote the low carbon and green development of coal chemical industry on the assumption of ensuring energy security and clean using of energy, the environmental impacts were also identified, and the major pollution processes and pollutants were determined. The results show that production of 1 ton coal-based oil, the total discharge of gaseous pollutants is 16.56 t, among which CO₂ is about 98.03% of the total emissions. It is mainly from the adjustment of C/H atomic ratio in the processing step and combustion discharge in the energy power generation step, being 53.9% and 25.87% respectively. The total amount of greenhouse gas emissions calculated by CO₂ is about 16.23 t, acidification gas is 33.847 kg SO₂, eutrophic composition is 30.483 kg PO₄, and photochemical smog generated is 2.651 3 kg C₂H₄, as well as dust is 0.834 kg. The total discharged wastewater is 8.204 4 t/t oil, and 68.74% of which is from the production process.

Key words: coal to liquid; life cycle assessment; pollutant emission; energy consumption; greenhouse gas

0 引 言

我国能源资源的基本特点为“富煤、贫油、少

气”的资源布局,2016 年中国石油表观消费量为 5.56 亿 t,同比增长 2.8%,对外依存度达到 65.4%;天然气消费量 2 058 亿 m³,同比增长

收稿日期:2017-09-05;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.02.022

基金项目:环境保护部“应对气候变化政策研究与能力建设”资助项目(CC20160801);北京应对气候变化研究和人才培养基地资助项目

作者简介:朱 玲(1975—),女,江苏靖江人,教授,博士,从事煤化工污染减排方面的研究工作。E-mail:zhuling75@bjpt.edu.cn

引用格式:朱玲,冯相昭,孔佳雯.基于生命周期评价 LCA 的煤制油生产过程分析[J].洁净煤技术,2018,24(1):119-126.

ZHU Ling, FENG Xiangzhao, KONG Jiawen. Analysis on production process of coal to oil with life cycle assessment[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1): 119-126.

6.6%,对外依存度达到34%^[1]。能源短缺,对外依存度持续增加使我国的能源安全问题面临严峻挑战。与此同时,2014年至今,煤炭消费总量已经出现连续下降趋势。因此,发展现代煤化工产业是发挥我国煤炭资源比较优势、降低石油天然气对外依存度、保障我国能源安全的重要途径。2017年国家发改委等7部委同意煤制油示范项目免征5年消费税,说明国家对煤化工产业做出了方向性选择,即国家倾向于鼓励煤制燃料路径的现代煤化工示范。

作为典型煤化工产业链的煤制油行业是一类能源替代型技术,将低阶煤炭转化为液体燃料^[2-4],同时也存在能耗较高、CO₂排放高、水资源消耗大等问题,煤制油产业的发展在国内受到广泛争议^[5-6]。2015年底环境保护部发布《现代煤化工建设项目环境准入条件(试行)》中提出要坚持最严格环保标准,示范项目执行能源、化工领域现行最严格的环保标准或更高环保要求^[7]。

对煤化工过程污染物排放统计和环境影响采用全生命周期评价(life cycle assessment, LCA)^[8-11]或者GREET模型^[12-13],多是针对煤制气生产过程以及煤制气产品使用过程,而鲜见针对煤制油过程的LCA评价研究。本文通过对国内煤制油企业的现场调研,以某时间段的原材料消耗和能源消耗数据为基础,通过LCA方法计算整个生产过程的能耗和污染物排放,并进行环境影响识别,分析其中的主要污染环节和主要污染物,旨在保证能源安全和清洁

利用能源的前提下,促进煤化工行业低碳绿色发展。

1 目标与范围定义

1.1 研究对象

本文以某煤制油企业为研究对象,该企业包括合成煤基油和合成氨2个重要部分,其中合成煤基油采用间接液化方法,经过加压气化→煤气净化→费托合成→油品加工等主要工艺过程,最终产品以轻烃、石蜡油、尿素和合成氨为主,还包括硫磺、焦油、H₂、CO₂等副产品。分析数据为该厂2013年全年生产过程中的原材料消耗以及产品产量。功能单位为1 t煤基油。

1.2 系统边界

煤制油工艺过程中会排放大量温室气体、废气和废水。因此,系统测算、评价煤制油从煤炭开发、煤制油生产全过程的能量消耗和环境排放出发,才能系统客观地认识其真正的环境影响。公司的产品主要供给中石化,中石化再把这种煤基油按一定比例加入成品油中出售,因此本文的生命周期分析不涉及成品油输送过程中的能量消耗和污染物排放,也不包括最终利用端的环境排放。

评价系统边界包括:煤炭开采、煤炭分选、煤炭运输、煤制油工厂加工(图1),为适当简化工作量并使结果更加直观,涉及运输载体、厂房设备等基础设施的生命周期排放等所占比例甚低的部分均不计入。

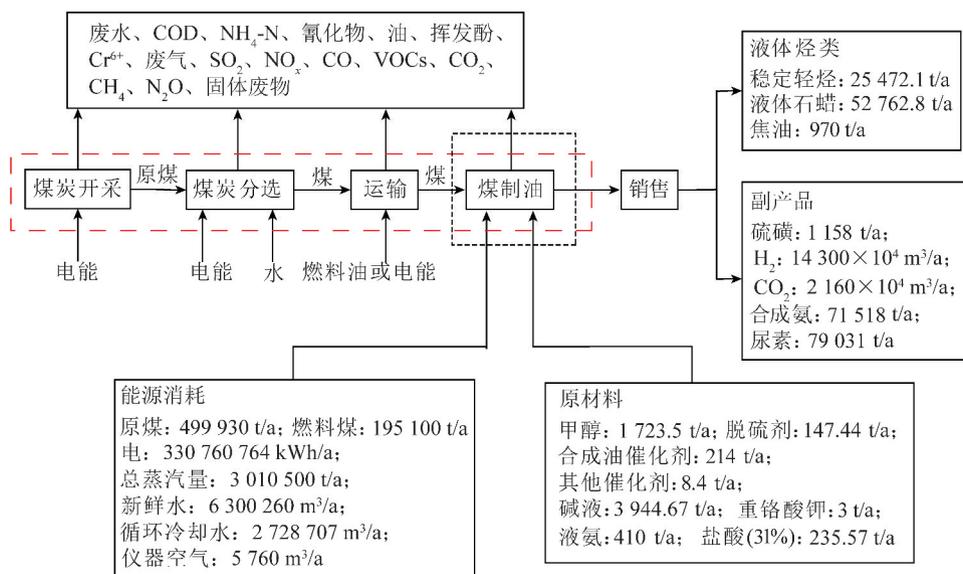


图1 煤制油产业链的系统边界

Fig. 1 System boundary of the coal-to-liquid chain

2 输入输出清单

关于生命周期清单数据,主要分为 2 部分,其中排放因子参数来自《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册(2010 修订版)》以及排放标准^[14]。本文所需的基础数据主要来源于中国核心生命周期数据库 CLCD^[15] 和其他国内出版物,同时辅以典型企业生产的数据及其他国内文献作为参考,清单数据的主要来源见表 1,其中,生产及运输参数主要包括企业生产、销售、使用过程中的数据。

表 1 生命周期清单数据来源

Table 1 Data sources for the LCA analysis

参数	数据类别	来源
排放因子参数	煤炭开采、分选过程排放因子	文献[14]
	铁路运输、公路运输排放因子	文献[15]
	生产过程排放因子	文献[14]
	工业锅炉排放因子	企业生产数据,标准
生产及运输参数	发电过程排放因子	文献[15]
	煤炭运输距离	企业生产数据
	运输距离	企业生产数据
	运输耗电量	企业生产数据
	工业锅炉燃烧效率	企业生产数据

表 2 原煤开采加工过程气态污染物排放

Table 2 Emission inventory and pollutant emissions for coal mining and washing

污染物	原煤开采加工过程的直接排放计算基准			原煤开采加工过程的间接排放计算基准		排放总量/kg
	采煤排放因子(开采过程)/(g·MJ ⁻¹)	选煤排放因子(分选过程)/(g·MJ ⁻¹)	加工过程排放限值 ^a /(mg·m ⁻³)	加工过程电耗排放 ^b /(kg·kWh ⁻¹)	我国燃煤工业锅炉平均排放因子(加工过程综合能耗排放)/(kg·t ⁻¹)	
CO ₂	4.259	5.733				3 105.200
CH ₄	0.422	0.425				263.300
N ₂ O	0.062×10 ⁻³	0.172×10 ⁻³			0.083 40	0.103
CO				1.55×10 ⁻³	1.143 80	0.800
VOCs				4.87×10 ⁻⁴	0.083 48	0.151
NO _x			300	6.46×10 ⁻³	5.565 90	2.694
SO ₂			300	9.93×10 ⁻³		3.556
PM			50	2.02×10 ⁻²		5.196

注:a 表示数据源自 GB 13271—2014;b 表示数据源自《中国火力发电燃料燃烧污染物排放清单》。

根据《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册(2010 修订版)》-0610,废水排放计算按规模≥120 万 t/a,井工开采/综采,末端治理采用化学混凝沉淀法,在 I 类地区废水排污系数为 0.14 t/t,生产 1 t 煤制油排放的总废水量为 1.485 t。

3.2 采煤过程中运输相关的污染物排放

煤炭运输阶段全程运输距离为 100 km,对于中

3 清单分析

3.1 采煤加工过程中的污染物排放

全厂合成油年耗煤 499 930 t,动力用煤按 7:3,总耗煤为 636 500 t,共生产各种烃类约 80 000 t,则 1 t 烃类耗煤为 7.956 t,已经超过《“十二五”煤化工示范项目能效和资源目标》中间接液化煤制油最高综合能耗规定的 4 t/t。

我国目前煤炭分选过程中平均损失率为 25%,根据煤炭开采和分选的排放因子,可计算该过程污染物的直接排放量;同时根据煤炭开采过程相关的电耗和综合能耗,结合《我国火力发电燃料燃烧污染物排放清单》^[16] 和我国燃煤工业锅炉平均排放因子^[17],计算所消耗电力和蒸汽等能耗生产过程气态污染物排放量,结果见表 2。

在煤炭加工过程中,根据《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册(2010 修订版)》4411 火力发电行业产排污系数表,取工业废气量为 10 000 Nm³/t 原料,根据 GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》^[18] 中 SO₂、NO_x 和 PM 排放限值,计算加工过程气态污染物的直接排放。

国的燃煤电厂来说,煤炭的调运方式包括铁路运输和公路运输,分别占比 70% 和公路 30%。

运输阶段的污染物排放主要来自于燃料燃烧(汽油和柴油)的排放。不同运输方式,其燃料种类、能源强度及燃料燃烧排放系数均不同。中国公用过程排放清单^[19] 和计算所得运输过程排放见表 3。

表3 运输过程排放清单和排放量

Table 3 Pollutant emissions during transportation for coal mining and washing

污染物	公路运输排放/ (mg · (t · km) ⁻¹)	铁路运输排放/ (mg · (t · km) ⁻¹)	排放总 量/kg
CO ₂	23 770.0	317 200.00	182.328 0
SO ₂	182.0	245.80	0.160 0
NO _x	764.1	70.57	0.443 0
CO	2 758.0	96.60	1.559 0
粉尘	—	308.60	0.073 7

3.3 煤制油生产所需原材料加工过程污染物排放

根据产排污系数,脱硫剂选用碳酸钙,重铬酸钾用重铬酸钠替代,液氨以合成氨为代表,煤制油生产所需原材料加工过程污染物的排放量见表4。

表4 煤制油生产所需原材料加工过程污染物的排放

Table 4 Discharge of pollutants in raw material processing for CTL program

1 t煤制油产生的排放量	甲醇	脱硫剂	碱液	重铬酸钾	液氨	盐酸(31%)	合计
工业废水量/t	1.142×10^{-1}	5.529×10^{-3}	5.918×10^{-1}	5.625×10^{-5}	2.563×10^{-2}	1.473×10^{-3}	0.740 8
化学需氧量/t	1.120×10^{-5}	—	3.352×10^{-5}	3.75×10^{-10}	1.281×10^{-6}	4.416×10^{-8}	4.605×10^{-5}
氨氮/t	3.448×10^{-6}	—	3.6×10^{-5}	—	7.688×10^{-7}	4.022×10^{-5}	8.044×10^{-5}
石油类/t	2.736×10^{-7}	—	—	—	4.1×10^{-8}	—	3.146×10^{-7}
挥发酚/t	6.463×10^{-9}	—	—	—	1.538×10^{-10}	—	6.616×10^{-9}
氰化物类/t	2.8×10^{-8}	—	—	—	2.05×10^{-9}	—	3.005×10^{-9}
六价铬/t	—	—	—	1.875×10^{-11}	—	—	1.875×10^{-11}
工业废气量/Nm ³	60.325	2.073 8	84.312	0.659	0.328	1.178	148.875
二氧化硫/t	2.973×10^{-5}	—	—	—	1.025×10^{-5}	—	3.998×10^{-5}
工业粉尘/t	—	$2.027 5 \times 10^{-6}$	$1.331 2 \times 10^{-6}$	$4.987 5 \times 10^{-8}$	—	—	3.408×10^{-6}
工业固体废物/t	—	—	—	—	$1.438 1 \times 10^{-3}$	—	$1.438 1 \times 10^{-3}$

表5 能源动力过程污染物环境排放统计

Table 5 Pollutant emissions in energy and power generation processes

项目	废水	COD/g	废气/m ³	NO _x /kg	SO ₂ /kg	PM ₁₀ /kg	CO/kg	CO ₂ /t	VOCs/kg
排放量	—	7.481 3	7.612×10^3	5.925 8	5.481 5	2.590 8	0.511 2	4.2	0.134 9

注:表中数据为1 t煤制油产生的污染物排放量。

3.5 煤制油过程相关的污染物排放

由于我国煤制油项目较少,在《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册(2010修订版)》中没有煤制油相关污染物的排放系数,因此CH₄、CO、VOCs和N₂O的排放是通过我国燃煤工业锅炉平均排放因子进行估算(表2)。SO₂、NO_x和PM同样通过产排污手册4411火力发电行业产排污系数表计算。

3.4 煤制油过程能源动力等污染物排放

根据国家能源局发布的2014年《我国电力工业统计数据》数据^[20],6 000 kW及以上电厂供电标准煤耗为318 g/kWh,按70%比例,生产过程总耗电量为231 532 535 kWh,耗煤量为73 627.346 t,1 t煤制油耗煤量为0.920 3 t,耗电289.416 kWh。

企业废气直排,废气处理工艺分别为静电除尘、低氮燃烧+烟气脱硝、石灰石-石膏法脱硫,根据《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册(2010修订版)》4411火力发电行业产排污系数表,计算得出污染物的排放量见表5。根据发电能耗和煤燃烧的CO₂排放系数2.46 kg/kg计算碳排放量。燃料煤在煤炭分选过程和运输过程中主要污染物的排放根据表2所列的排放因子计算;蒸汽生产以煤和水为原料,不再进行单独计算。

在调研过程中发现,该企业的废水经处理后没有回用而直接排放,生产每吨油的耗水量远高于《“十二五”煤化工示范项目技术规范》中要求的间接液化煤制油11 t/t的最高耗水量。本文采用《中国煤制油发展现状与趋势分析》^[21]及《煤电基地开发与水资源研究》^[22]中间接煤制油的废水量,以5.64 t/t计算。

由于煤的H/C原子比在0.2~1.0,石油H/C

原子比为 1.6~2.0,煤制油过程中伴随着 H/C 原子比的调整,排放大量的 CO₂。每单位煤炭在煤制油过程中的碳排放 F ,可由煤炭中潜在的碳排放量与汽油中的潜在碳排放量之差计算得出^[11],即

$$F = \frac{44}{12} CC_{FC} FOR_{FC} - \frac{44}{12} CC_{FN} \eta_e$$

式中, CC_{FC} 为煤炭的含碳量,取 24.74 g/MJ; FOR_{FC} 为煤制油工业过程中的碳氧化率,取 90%^[9]; CC_{FN} 为煤制汽油的含碳量, g/MJ; η_e 为煤制油(间接氧化)的能量转化效率,取 42%。

对于煤制汽油的含碳量 CC_{FN} ,汽油单位体积含碳量 C (kg/L) 与汽油密度 d (kg/L) 呈显著的线性关系,汽油密度为 0.725 kg/L,在数值上二者关系为 $C = 0.870\ 553\ 8d - 0.009\ 476\ 8$,根据汽油热值

46.6 MJ/kg 计算得出 $CC_{FN} = 18.40$ g/MJ。

$$F = \frac{44}{12} CC_{FC} FOR_{FC} - \frac{44}{12} CC_{FN} \eta_e = \frac{44}{12} \times 24.74 \times 90\% - \frac{44}{12} \times 18.40 \times 42\% = 53.306\ \text{g/MJ}$$

精煤热值按 26.38 MJ/kg 计算,加工过程共排放 CO₂ 为 8.747 0 t/t(以油计,下同),高于“十二五”《煤炭深加工产业示范项目规划》^[4]中煤间接制油(6.1 t/t),这与该企业的煤耗高于 4 t/t 间接液化煤制油最高综合能耗直接相关。因此,温室气体排放是发展煤化工所必须付出的环境代价^[5-6]。

3.6 数据统计

煤制油项目各阶段的排放见表 6。

表 6 煤制油项目各阶段气态污染物环境排放统计

Table 6 Statistics of pollutants for various stages of the CTL program

项目	1 t 煤制油的排放量/kg								合计
	CO ₂	CH ₄	NO _x	SO ₂	粉尘	CO	VOCs	N ₂ O	
煤炭开采加工	3 105.2	263.3	2.694	3.556	5.196	0.8	0.151	0.103	3 381
煤炭运输	182.328	—	0.443	0.16	0.073 7	1.559	—	—	184.563 7
原料加工				0.04	0.003 04				0.043 04
工厂加工	8 747	0.696	13.311	8.487	1.927	7.178	0.532	0.174	
能源动力过程	4 200		5.925 8	5.481 5	2.590 8	0.511 2	0.134 9		4 214.644
合计	16 234.528	263.996	22.580	18.041	10.434	10.097	0.834	0.277	16 560.787

由图 2 可见,在煤制油过程中排放量最大的气态污染物是 CO₂,占总排放量的 98.03%,CO₂ 排放总量中主要是工厂加工阶段中 C/H 原子比的调整释放以及能源动力阶段中煤炭燃烧的排放,分别占 53.9% 和 25.87%。CO₂、CH₄ 和 N₂O 三种温室气体排放总量占气态污染物排放量的 99.62%。在间接液化工艺中,CO₂ 主要是煤气化过程产生的。

通过开发新的煤气化技术,减少气化装置能耗和 CO₂ 排放,使煤间接制油在过程经济上具有竞争力,满足环保要求。2016 年发布的《“十三五”控制温室气体排放工作方案》^[23]中提出,在煤基行业开展碳捕集、利用和封存的规模化产业示范,控制煤化工等行业碳排放。

煤制油生产过程中水资源消耗量较大,项目各阶段的废水排放见表 7。

工厂加工即煤制油转化过程是废水排放的主要阶段,主要用水项目包括用于冷凝的冷却水、用于加热的水蒸气用水、反应用水、洗涤用水和生活用水

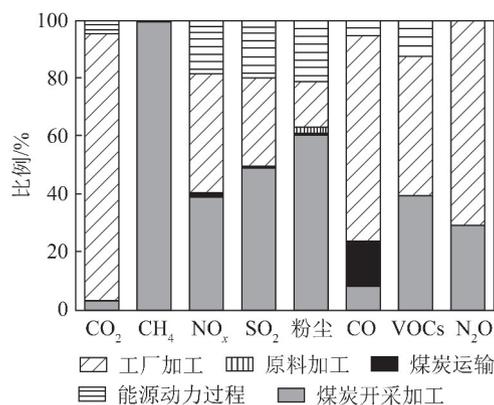


图 2 煤制油 LCA 过程中各种气态污染物排放

Fig. 2 Distribution of gaseous pollutant emissions in the major five steps of the CTL program

等,占总排放量的 68.74%。煤制油作为典型的煤化工过程,在消耗大量煤炭资源的同时,也会消耗煤炭产地大量的水资源。目前我国已投产、在建或规划的大型煤制油项目主要集中在内蒙古鄂尔多斯、陕西榆林、山西、宁夏、新疆等西部相对缺水地区,如

表7 煤制油项目各阶段废水排放量统计

Table 7 Statistics of waste water for various stages of the CTL program

项目	1 t 煤制油废水排放量/t	占比/%
煤炭开采加工	1.485 0	18.10
原料加工	0.740 8	9.03
工厂加工	5.640 0	68.74
能源动力过程	0.356 6	4.13
合计	8.204 4	100

果大量使用黄河及其支流水资源,将进一步挤占生态用水,使原本脆弱的西部生态环境更加恶化。水耗的第二大来源是煤炭开采分选过程,排放废水占总排放量的18.1%,利用技术革新和流程优化等方法可以减少废水排放量。因此,可以从生产过程入手和废水处理回用角度降低煤制油废水排放量。

魏思策等^[24]对国内主要5个煤炭基地以区域为尺度的水足迹结构分析和评价比较,除陕北基地以外各地区煤制油蓝水足迹均接近或超过1亿t、灰水足迹均超过2亿t,煤制油作为一项高耗水产业,直接生产过程需要消耗大量新水并排出大量废水,而且生产所用的电力资源及煤炭资源对水资源也有很大影响,其中生命周期蓝水约占蓝水总量的

50%,生命周期灰水约为总灰水足迹的1/3,成为水足迹中不可忽略的重要组成部分。

4 环境影响分析

4.1 生命周期评价方法

本文所考虑的生命周期影响类型见表8。各种气体污染物带来不同环境影响的贡献度是基于中国科学院生态环境研究中心提出的方法^[19],此方法基于SETAC和ISO框架,并根据中国国情进行一定的修订。

表8 煤制油项目生命周期影响类型^[10-11]Table 8 Life cycle impact categories and characterization factors^[10-11]

能源耗竭	全球性
粉尘	局地性
全球变暖	全球性
酸化	地区性
富营养化	地区性
光化学烟雾	地区性

4.2 环境影响潜值

煤制油项目产1 t煤制油的各影响潜值及加权后的总影响潜值见表9。

表9 煤制油项目产1 t煤制油加权后的总影响潜值

Table 9 Environmental effect analysis of the CTL program

影响类型	污染物	排放量/kg	效应当量因子	影响潜值/kg	标准化基准/($\text{kg} \cdot (\text{人} \cdot \text{a})^{-1}$)	权重因子	加权后影响潜值(PET ₂₀₁₀)
全球变暖(GWP)	CO ₂	16 234.528	1	16 234.528	8 700(CO ₂)	0.83	2.186
	N ₂ O	0.277	298	82.546			
	CH ₄	263.996	25	6 599.9			
	小计(折合成CO ₂)			22 916.974			
酸化(AP)	SO ₂	18.041	1	18.041	36(SO ₂)	0.73	0.686
	NO _x	22.58	0.7	15.806			
	小计(折合成SO ₂)			33.847			
富营养化(EP)	NO _x	22.58	1.35	30.483	61(PO ₄)	0.73	0.365
	小计(折合成PO ₄)			30.483			
光化学烟雾(POCP)	CO	10.097	0.03	0.302 9	0.65(C ₂ H ₄)	0.51	2.080
	VOCs	0.834	0.6	0.500 4			
	CH ₄	263.996	0.007	1.848 0			
	小计(折合成C ₂ H ₄)			2.651 3			
粉尘 Dust	PM ₁₀	10.434	1	0.834	18	0.61	0.028
合计		5.345					

煤制油项目对全球变暖 GWP 的影响最大(2.186),对光化学烟雾 POCP 的影响次之(2.08),对酸化 AP 和富营养化 EP 的影响也不可忽略,对粉尘 Dust 的影响最小(仅 0.028)。说明煤制油项目对当地的环境影响远低于全球性和区域性^[25]。

因此要提高煤制油转化效率、减少 CO₂ 的排放,应该优化各个加工环节工艺,或采取有效措施收集处理排放的 CO₂ 气体。

5 结 论

1) 运用 LCA 方法对煤制油生产的全过程清单分析,计算各排污环节污染物排放量。从能源消耗和污染物排放角度,煤制油在一定程度上减少了石油消耗,但是煤制油过程中温室气体和光化学烟雾排放量较大,因而对于减缓温室气体污染方面意义颇小。

2) 获取 1 t 煤制油的温室气体排放量约为 16 234.528 kg(按 CO₂ 计算),约为石油基油品的 2.0~2.2 倍,其原因在于炭基原料中 H/C 越低,CO₂ 排放量越大,而煤的 H/C 比石油小得多。若能将煤制油这一环节所产生的 CO₂ 进行回收利用,能有效减小煤制油项目对环境的不利影响。

3) 获取和利用 1 t 煤制油的酸化气体量为 33.847 kg(折合成 SO₂),富营养化成分为 30.483 kg(折合成 PO₄),产生光化学烟雾量为 2.651 3 kg(折合成 C₂H₄),粉尘量为 0.834 kg。

4) 煤制油项目并非是一种绿色低碳的项目,在发展煤化工产业的同时,更需要相关排放法规政策的约束,降低能耗和污染物排放。

参考文献 (References):

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2016 年国民经济和社会发展统计公报 [R/OL]. (2017-02-08). http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201702/t20170228_1467424.html.

[2] 肖维,康宇洁,杨磊. 发展煤制天然气产业利弊分析[J]. 中国资源综合利用,2015,33(7):57-60.
XIAO Wei, KANG Yujie, YANG Lei. Analysis of advantages and disadvantages in the development of coal gas Industry in guizhou [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2015, 33(7): 57-60.

[3] 徐振刚. 我国现代煤化工跨越发展二十年[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(1):1-5.
XU Zhengang. Development history of modern coal chemical industry in recent 20 years[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(1): 1-5.

[4] 武建军,郭凡辉,孙少杰,等. 中国民用煤洁净化利用现状及展望[J]. 洁净煤技术,2017,23(4):1-11.
WU Jianjun, GUO Fanhui, SUN Shaojie, et al. Status and prospect of cleaning utilization of civil coal in China[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 1-11.

[5] 余波,曹晨,顾为东. 中国能源消费结构与风电/煤制天然气耦合经济性分析[J]. 中国工程科学,2015,17(3):100-106.
YU Bo, CAO Chen, GU Weidong. Energy consumption structure in China and the economic analysis of coupled wind power and coal to substitute natural gas [J]. Engineering Sciences, 2015, 17(3): 100-106.

[6] 黄格省,李振宇,王建明. 我国现代煤化工产业发展现状及对石油化工产业的影响[J]. 化工进展,2015,34(2):295-302.
HUANG Gesheng, LI Zhenyu, WANG Jianming. Development status of coal chemical industry in China and its influence on petrochemical industry [J]. Chemical Industry and Engineering Process, 2015, 34(2): 295-302.

[7] 中华人民共和国环境保护部. 《关于印发〈现代煤化工建设项目环境准入条件(试行)〉的通知》[R/OL]. (2015-12-22). http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201512/t20151231_320911.htm.

[8] 付子航. 煤制天然气碳排放全生命周期分析及横向比较[J]. 天然气工业,2011,30(9):100-104.
FU Zhihang. Life cycle assessment of carbon emission from synthetic natural gas (SNG) and its horizontal comparison analysis[J]. Natural Gas Industry, 2011, 30(9): 100-104.

[9] 唐玉婷,马晓茜,廖艳芬,等. 煤制取天然气全生命周期评价分析[J]. 环境工程,2013,31(5):139-142.
TANG Yuting, MA Xiaoqian, LIAO Yanfen, et al. Life cycle assessment on producing synthetic natural gas from coal [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(5): 139-142.

[10] 杨舒鸿,丁艳军. 煤制天然气技术路线的全生命周期分析[J]. 现代化工,2012,32(9):4-7.
YANG Shuhong, DING Yanjun. Life cycle assessment on synthetic natural gas (SNG) technology [J]. Modern Chemical Industry, 2012, 32(9): 4-7.

[11] 龚梦洁,李惠民,齐晔. 煤制天然气发电对中国碳排放和区域环境的影响[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(1):83-89.
GONG Mengjie, LI Huimin, QI Ye. Impact of coal-based synthetic natural gas to electricity on carbon emissions and regional environment in china [J]. China Pollution, Resources and Environment, 2015, 25(1): 83-89.

[12] DING Yanjun, HAN Weijian, CHAI Qinhu, et al. Coal-based synthetic natural gas (SNG): A solution to China's energy security and CO₂ reduction? [J]. Energy Policy, 2013, 55: 445-453.

[13] LI Sheng, JIN Hongguang, GAO Lin, et al. Techno-economic performance and cost reduction potential for the substitute/synthetic natural gas and power cogeneration plant with CO₂ capture [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 85: 875-887.

[14] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国

- 污染源普查工业污染源产排污系数手册(2010 修订版)[M]. 北京:中国环境科学出版社,2010.
- [15] 亿科环境科技. CLCD 数据库—中国生命周期核心数据库[DB/OL]. (2012-1-08). <http://www.ike-global.com/products-2/clcd-intro>.
- [16] 狄向华, 聂祚仁, 左铁镛. 我国火力发电燃料燃烧污染物排放清单[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 632-635.
DI Xianghua, NIE Zuoren, ZUO Tiejong. Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China[J]. China Environmental Science, 2005, 25(5): 632-635.
- [17] 孙德刚. 燃煤工业锅炉污染物排放特征及节能减排措施研究我国燃煤工业锅炉平均排放因子[D]. 北京:清华大学, 2010.
- [18] 锅炉大气污染物排放标准. GB 13271—2014[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2014.
- [19] 杨建新. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京:气象出版社, 2002.
- [20] 中华人民共和国统计局. 中国统计摘要 2015[M]. 北京:中国统计出版社, 2016.
- [21] 中国产业调研网. 《中国煤制油行业现状调研分析及发展趋势预测报告(2017 年版)》[R/OL]. (2016-12-05). <http://www.cir.cn/8/06/MeiZhiYouDeFaZhanQianJing.html>
- [22] 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程重点实验室. 噬水之煤: 煤电基地开发与水资源研究[M]. 北京:中国环境出版社, 2012.
- [23] 国务院. 《国务院关于印发“十三五”控制温室气体排放工作方案的通知》[R/OL]. (2016-10-27). http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/04/content_5128619.htm.
- [24] 魏思策, 石磊. 基于水足迹理论的煤制油产业布局评价[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4203-4214.
WEI Sice, SHI Lei. The coal-oil industrial layout evaluation based on water footprint theory[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4203-4214.
- [25] 朱彬彬, 王敏, 韩红梅. 煤炭利用路线能源效率的全生命周期法评价[J]. 化学工业, 2013, 31(6): 24-28.
ZHU Binbin, WANG Min, HAN Hongmei. Research on energy efficiency in different way of coal using as energy resource by the method of life cycle assessment[J]. Chemical Industry, 2013, 31(6): 24-28.