

基于全生命周期的褐煤制气与发电温室气体排放对比研究

韩雅文^{1, 2)}, 王安建^{2)*}, 周凤英²⁾, 邢万里²⁾

1)中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2)中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心, 北京 100037

摘 要:我国褐煤资源较为丰富, 主要分布于内蒙古东部、云南省和黑龙江省。褐煤主要的传统利用方式是直接燃烧发电, 但其存在能效低、污染重等问题。除发电外, 褐煤新型利用方式逐渐成熟, 制取天然气以及提质后发电就是其中的代表。本文基于全生命周期评价法, 计算了褐煤制取天然气与褐煤提质后发电在终端利用能效相同的情况下, 产生 1 GJ 有效能量的温室气体排放量, 分别为 158.173/e kg/GJ、480.68/e kg/GJ(e 为能源终端使用能效)。显然, 从温室气体排放角度, 褐煤制取天然气优于提质褐煤发电技术。

关键词:提质褐煤发电; 褐煤制气; 全生命周期评价; 温室气体排放

中图分类号: P618.11; X51 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2017.01.09

A Comparative Analysis of Life-cycle Greenhouse Gas Emission between Lignite-based Synthetic Natural Gas Production and Power Generation

HAN Ya-wen^{1, 2)}, WANG An-jian^{2)*}, ZHOU Feng-ying²⁾, XING Wan-li²⁾

1) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083;

2) Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: China has relatively abundant lignite, which is mainly distributed in eastern Inner Mongolia, Yunnan Province and Heilongjiang Province. Traditionally, the thermal power generation is the predominant way to use lignite; nevertheless, it is also the way with low energy utilization rate and high pollution. In addition to power generation, new technologies dealing with lignite have matured. Lignite-based synthetic natural gas production and power generation with lignite upgrading technology are of representativeness. Based on Life Cycle Assessment, this paper compared the Greenhouse Gas (GHG) emissions of 1GJ output of effective energy between lignite-based Synthetic Natural Gas (SNG) production and power generation with lignite upgrading technology under the condition of the same energy efficiency of end use. They are respectively 158.173/e kg/GJ, 480.68/e kg/GJ (e as the energy efficiency of end use). Obviously, the life cycle GHG emission of lignite-based SNG production is significantly less than that of the upgraded lignite-power generation.

Key words: upgraded lignite-power generation; lignite-based SNG; life cycle assessment; greenhouse gas emissions

褐煤是煤化程度最低的矿产煤, 具有水分大 (20%~60%)、发热量低(10~20 MJ/kg), 挥发分含量高、运输半径小等特征。直接燃烧将产生大量的二氧化碳。截至 2013 年底, 我国褐煤探明储量达到 186 亿吨, 占全部煤炭探明储量的 16.3%(BP, 2014), 主要分布在内蒙古东部、黑龙江省和云南省。国际

本文由中国地质调查局地质矿产调查评价项目“能源安全综合研究与动态跟踪评价”(编号: 12120115057001)资助。

收稿日期: 2016-05-19; 改回日期: 2016-06-10。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 韩雅文, 女, 1991 年生。博士研究生。主要从事资源经济学和矿产资源战略的研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。电话: 010-68997436。E-mail: hyxiaoxiaowen@sina.com。

*通讯作者: 王安建, 男, 1953 年生。研究员。主要从事矿床学、矿产资源经济及矿产资源战略研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。电话: 010-68997436。E-mail: ajwang@cags.ac.cn。

万方数据

能源署(IEA)数据显示,我国褐煤生产量和消费量仅次于德国,位居世界第二(IEA, 2015)。

当前,全球气候变暖与碳排放问题已经成为各国关注的焦点。2016年4月22日,175个国家领导人共同签署了气候变化问题《巴黎协定》,承诺将全球气温升高幅度控制在 2°C 的范围之内。中国承诺到2030年单位国内生产总值 CO_2 排放比2005年下降60%至65%, CO_2 排放达到峰值并争取尽早实现。与发达国家相比,我国面临着较大的减排压力,同时,我国西部地区占全国碳排放总量的份额仍呈逐步增加的趋势(刘占成等, 2010; 李晓明等, 2010; 陈子瞻和王高尚, 2017)。因此,如何低碳洁净利用褐煤是我国煤炭产业中不容忽视的问题。

目前,我国褐煤的利用方式主要包括发电、直接燃烧制热(散烧)、液化、制气等。其中,最主要的利用方式是燃烧发电,约占褐煤消费的90%(郭志航, 2015)。褐煤制气与褐煤提质后发电则是两种新型的褐煤利用方式。本文对比分析了全生命周期褐煤制气与提质褐煤发电的温室气体排放水平,从碳排放的角度对两种褐煤利用方式进行探讨。

1 研究现状

相关研究表明,褐煤干燥技术与火电机组耦合,可大幅度降低褐煤煤耗,减少 CO_2 排放(郭晓克等, 2011),而大容量、高参数的发电机组可使 CO_2 排放进一步降低,并且有利于碳捕获(刘睿和翟相彬, 2014)。

全生命周期评价法(Life Cycle Assessment, 简称 LCA)是国际上普遍认同的一种环境管理工具,起源于1969年美国中西部研究所受可口可乐委托,对饮料容器从原材料采掘到废弃物最终处理的全过程进行的跟踪与定量分析。它是评价产品、工艺过程或活动整个生命周期系统环境负荷的完整过程,整个生命周期包括原材料的提取、加工、生产、运输、销售、使用、再回收和维护、废物循环及最终废弃物弃置(杨建新和王如松, 1998)。国内外不乏关于煤炭发电与制气的全生命周期碳排放研究。Jaramillo 等(2007)比较了美国煤炭与天然气、进口液化天然气(Liquefied Natural Gas, 简称 LNG)、煤制气(Coal to Synthetic Natural Gas, 简称 C-SNG)在各种技术水平下发电的污染气体排放水平,认为如果采用联合循环高效发电技术及碳捕获与封存技术(Carbon Capture and Storage, 简称 CCS)时,C-SNG比进口 LNG 更有减排优势。Ding 和 Han(2013)在 GREET 模型中加入 C-SNG 及终端利用模块,对比分析了中国 C-SNG 与其他替代方式在烹饪、发电、蒸汽生产、汽车动力四个方面的能效和温室气体

(Greenhouse Gas, 简称 GHG)排放,结果显示 C-SNG 并不是中国节能减排的正确选择。Yang 和 Jackson(2013)认为应该禁止煤制气项目。Li 等(2016)认为 C-SNG 与电联产时节能减排效果较好,可以在中国可以推广。

前人研究中较少从碳排放的角度对褐煤的新型利用方式进行探讨。本文通过全生命周期评价法计算褐煤制气(Lignite to Synthetic Natural Gas, 简称 L-SNG)、提质褐煤发电的温室气体排放情况,并与我国褐煤普通发电水平的 GHG 排放进行比较,从碳排放的角度得出褐煤利用的最优方式。

2 褐煤不同利用方式 GHG 排放情况比较

2.1 全生命周期评价(LCA)边界的确定

为了使不同的使用终端具有可比性,本文考虑能源的转化效率,将功能单位定为1 GJ。假定终端用户分别从制气或发电获取了1 GJ有效能量,在考虑使用能效的情况下,倒推计算各生产与消费环节的 GHG 产生量,然后相加得出 GHG 排放总量。褐煤制气与发电产生的 GHG 组成为: CO_2 、 CH_4 及 N_2O ,并全部换算为 CO_2 当量。

评价系统包括厂房生命周期、管线生命周期和燃料生命周期(唐玉婷等, 2013)。由于运输载体、厂房设备等基础设施的生命周期排放等在边际量中所占比例甚低,当生产出的 L-SNG 及电力使用的是已有管线时,分摊到边际量上的 GHG 排放则更少,故厂房生命周期(包括建材开采加工、建材运输、厂房建设和厂房退役)和管线生命周期(包括管线生产加工、管线运输、管线建设)的 GHG 排放均不予计入(付子航, 2010; Ding and Han, 2013)。对于燃料生命周期, L-SNG 评价系统的边界包括:褐煤开采、褐煤洗选、褐煤运输、L-SNG 工厂加工、L-SNG 管道运输、L-SNG 使用;褐煤提质发电评价系统的边界包括:褐煤开采、褐煤洗选、褐煤运输、发电厂燃煤供电、电力输送、电力使用(图 1)。

2.2 L-SNG 全生命周期各环节 GHG 排放

本文褐煤制气以内蒙古兴安盟拟建年产40亿标准立方米的 L-SNG 煤化电热一体化示范项目为研究实例。项目不采用 CCS,所产生的 GHG 全部排空。

2.2.1 L-SNG 终端利用

根据调研数据,1 km^3 L-SNG 完全燃烧产生35.01 GJ 热量。由于在热效率计算中采用的是低位热值,且天然气低位热值与高位热值的差距约为3.7 GJ/ km^3 (赖元楷, 2006),得出 L-SNG 的低位热值为31.31 GJ/ km^3 。根据 L-SHG 的组分(表 1),可得1 m^3 L-SNG 完全燃烧产生1.91 kg CO_2 。煤制天然

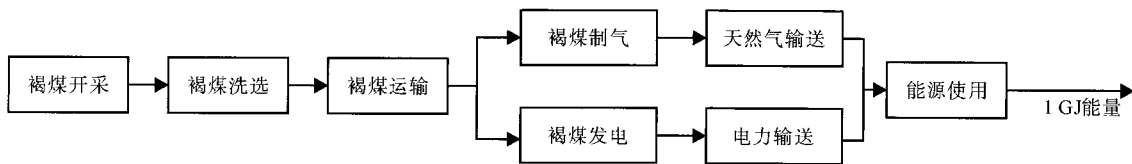


图1 褐煤利用的生命周期边界
Fig. 1 Scope of life-cycle analysis of lignite utilization

表1 L-SNG天然气组分
Table 1 Natural gas composition of the L-SNG project

成分	CO ₂	N ₂	H ₂	CO	CH ₄	总硫	H ₂ O
含量 v%	0.201	0.69	1.52	0.002	97.268	≤ 20 × 10 ⁻⁹	饱和

气的终端直接利用方式主要为燃气锅炉供暖、燃气灶和天然气汽车等，其能效跨度范围较大。分户式燃气壁挂炉能源转化效率可高达 96%，燃气锅炉为 85%~95%，燃气灶等效为 53%~68%，天然气汽车的能效较低，为 15%~33%(杨通，2011；李舟等，2013；杜学平等，2014；王秀林等，2015；百度百科，2016)。可设定能效高位与低位值分别为 96%、15%。此外，天然气也可用于发电，但是在煤炭—煤制天然气—发电—能源使用的过程中，煤炭经历了两次转化，从理论上来说能效比煤炭经过一次转化的情况要低，因此不考虑煤制天然气用于发电的情形。

2.2.2 L-SNG 管道运输

管道运输所带来的 GHG 排放主要来自于能源消耗。天然气管道的能耗可分为直接能耗和间接能耗。直接能耗是指压缩机组能耗、燃料气消耗以及管道阻力损失等在天然气输送过程中产生的能耗。间接能耗是指天然气放空、泄漏等所导致的直接损失(刘银春等，2007)。L-SNG 管道运输的能耗指标参照国内近年来的新建工程数据，即 0.556 8 MJ/(10³ m³ · km) (付子航，2010)。这里把能耗折合成该种 L-SNG 消耗量，其引致的 GHG 排放来源于这部分 L-SNG 的生产及消耗。经换算管道运输的能耗指标为 0.018 m³ L-SNG/(10³ m³ · km)，L-SNG 的运输管道以中等距离 786 km 计。根据调研数据可得出生产 L-SNG 的 CO₂ 的排放数据为 2.91 kg/m³；CH₄ 的排放数据为 0.000 229 kg/m³；N₂O 的排放基本为 0。L-SNG 完全燃烧排放数据为 1.91 kg/m³ CO₂。根据以上数据，运输消耗的 L-SNG 的 CO₂ 排放因子为 4.82 kg/ m³，CH₄ 排放因子为 0.000 229 kg/m³。

2.2.3 L-SNG 生产

褐煤制气工厂所使用原料煤及动力煤都以褐煤[HM52]为主。在实际情况中，褐煤开采后不进行选煤处理，其选煤程序一般后置于煤制气厂内进行。关键工序采用固定床碎煤加压气化技术和戴维甲烷合成技术。CO₂ 的排放数据为 2.91 kg/m³；CH₄

的排放数据为 0.000 229 kg/m³；N₂O 的排放基本为 0(同上文)。

2.2.4 褐煤运输

煤制气工厂制气煤耗(原煤)为 5.07 kg/m³(调研获得)。褐煤通过铁路专线、公路、皮带传送结合的方式进行短途运输。运输阶段的温室气体排放主要来自于运输工具燃料燃烧(汽油和柴油)时的排放。由于都是在坑口建厂，煤炭距离很短，GHG 排放忽略不计。但运输过程中存在一定的煤炭损耗，损失量按 1%计算(夏德建，2010)。

2.2.5 褐煤开采

煤制气工厂所使用的煤炭全部来自霍林河煤田，该露天煤矿采煤使用单斗—卡车—半固定破碎站—带式输送机半连续开采工艺，剥离使用单斗—卡车开采工艺。采煤过程中 GHG 的主要来源为燃油、炸药、溢散、自燃和电力五方面。具体为柴油、汽油的消耗引起的碳排放，爆破环节炸药发生化学反应释放的温室气体，露天煤矿开采过程中部分温室气体的逸散，露天煤矿非受控自燃引起的碳排放和使用电力间接引起的碳排放。该露天煤矿吨煤(原煤)CO₂ 当量排放量为 10.69 kg/t(张振芳，2013)。

此外，开采 1 t 原煤会产生 0.01 t 原煤的自燃损失(夏德建，2010)。

2.3 褐煤燃烧发电全生命周期各环节 GHG 排放

本文褐煤发电以内蒙古华能伊敏电厂三期工程为依托。褐煤经提质后再用来发电，电厂不采用 CCS，所产生的 GHG 全部排空。

2.3.1 终端用户的电器用电和电力输送

电力的终端用电器主要有灯具、电磁炉、电暖气、工业电机和电动车。电地暖的热效率近与 99%，电磁炉热效率约为 86%~90%，电机运行效率为 85%~95%，电动车效率为 59%~66%。(常涤非，2015；王秀林等，2015；Fueleconomy，2016)。可设定能效高位与低位值分别为 99%、59%。一般认为，电器在耗电过程中不产生 GHG。高压输电中的 GHG 排放主要来自于高压输电时的损耗，由线路损耗和站点

表 2 计算过程中需要的数据
Table 2 Required data in the calculation

所需数据	数值	数据来源
普通褐煤供电标准煤耗	0.0003 018 9 tce/kWh	郭晓克等, 2011
褐煤提质后供电标准煤耗	0.000 286 2 tce/kWh	郭晓克等, 2011
普通褐煤供电 CO ₂ 排放量	540 万 t/a	郭晓克等, 2011
褐煤提质后供电 CO ₂ 排放量	518 万 t/a	郭晓克等, 2011
普通褐煤供电 NO _x 排放量	5 742 t/a	郭晓克等, 2011
褐煤提质供电 NO _x 排放量	5 120.5 t/a	郭晓克等, 2011
普通褐煤发电机组年燃煤量(原煤)	234.04 万 t/a	郭晓克等, 2011
褐煤提质发电机组年燃煤量(原煤)	223.2 万 t/a	郭晓克等, 2011
燃煤电厂按常规燃烧方式所生成的 NO _x 中, N ₂ O 占比	1%	夏德建, 2010
褐煤原煤与标煤之间的质量转换折合系数	0.4023	由褐煤低位发热值与标煤低位发热值换算而得

(变电站或换流站)损耗两部分组成。假设电力由高压直流电进行输送, 假定运输距离与上述的输气距离相等, 仍为 786 km, 其损耗率为:

$$\delta = 0.0000308L + 0.015$$

式中 L 为运输距离(单位: km)(张杨等, 2013), 则计输电损耗率为 3.92%。

2.3.2 发电厂的煤-电转换

电厂煤-电转换过程中, 产生的温室气体主要是 CO₂ 和少量的 N₂O。普通褐煤发电 GHG 排放为:

CO₂ 排放:
$$540 \times 10^7 / (2340400 / (0.00030189 / 0.4023)) \text{ kg/kWh}$$
$$= 1.73 \text{ kg/kWh};$$

N₂O 排放:
$$5742 \times 10^3 \times 0.01 / (2340400 / (0.00030189 / 0.4023)) \text{ kg/kWh}$$
$$= 1.84 \times 10^{-5} \text{ kg/kWh}$$

对于提质褐煤发电厂, 采用优质褐煤为动力煤, 与普通褐煤发电不同的是增加蒸汽回转干燥工艺对褐煤进行干燥, 发电机组为 2×600 MW 超临界机组。由于在实际情况中, 发电厂不采用经过洗选的褐煤, 褐煤的处理、干燥发生在发电厂内部。褐煤在干燥过程中产生的 GHG 排放主要来自于干燥岛的电能消耗, 而发电厂的供电能耗中包含了这一部分。计算可知提质发电供一度电产生的 GHG 排放为:

CO₂ 排放:
$$518 \times 10^7 / (2\ 232\ 000 / (0.000\ 286\ 2 / 0.402\ 3)) \text{ kg/kWh}$$
$$= 1.65 \text{ kg/kWh};$$

N₂O 排放:
$$5\ 120.5 \times 10^3 \times 0.01 / (2\ 232\ 000 / (0.000\ 286\ 2 / 0.402\ 3)) \text{ kg/kWh}$$
$$= 1.63 \times 10^{-5} \text{ kg/kWh}$$

以上计算过程所需数据见表 2。

2.3.3 褐煤运输及开采

发电站为坑口发电站, 运输中产生的 GHG 计为 0。提质褐煤电厂采用伊敏露天煤矿褐煤, 由于其开采工艺与霍林河露天开采工艺类似, 吨煤(原煤)二氧化碳当量排放量仍取 10.69 kg/t。此外, 该种褐煤的热值为 11.79~13.08 MJ/kg, 故普通褐煤发电

时也不对其进行洗选处理(牛焱, 2005; 郭晓克等, 2011)。

2.4 不同褐煤利用情形 GHG 排放对比

全球变暖潜力(Global Warming Potential, 简称 GWP)是物质产生温室效应的一个指数, 表征各种温室气体折算为 CO₂ 的当量。部分温室气体在 100 年框架内的预设 GWP 值(Wikipedia, 2016), 如表 3 所示。

根据上文的分析 L-SNG 全生命周期 GHG 排放公式为:

$$GHG = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 N_i F_{ij} GWP_j + C_m F_m$$

其中, N_i 表示生产 1 GJ 有效能量时在天然气使用、运输、生产三个过程中所需的 L-SNG 的量。 F_{ij} 表示在第 i 过程中第 j 种温室气体的排放因子, 该值在前文的计算中已获得。 GWP_j 为 j 种温室气体的 GWP 值。 C_m 表示生产 1 GJ 有效能量所需开采的褐煤的量, F_m 表示 CO₂ 当量排放因子。该公式只对于本文的假设条件适用。令天然气的使用效率为 e 。生产 1 GJ 有效能量需要使用的天然气为:

$$\frac{1}{e} \times \frac{1}{31.31} \times 1000 \text{ m}^3,$$

即 $\frac{31.94}{e} \text{ m}^3$ (也即煤制气厂生产的供终端使用

的 L-SNG 的量);

管道运输消耗的天然气为:

$$\frac{31.94}{e} \times 0.018 \times 786 / 1000 \text{ m}^3,$$

即 $\frac{0.452}{e} \text{ m}^3;$

表 3 部分温室气体的预设 GWP 值
Table 3 Preset GWP Value on Part of the Greenhouse Gases

温室气体	GWP 值
CO ₂	1
CH ₄	34
N ₂ O	298

需要开采的褐煤为:

$$(\frac{31.94}{e} + \frac{0.452}{e}) \times 5.07 \times \frac{1}{0.99} \times \frac{1}{0.99} \text{ kg},$$

即 $\frac{167.562}{e} \text{ kg}。$

同理, 煤炭发电全生命周期 GHG 排放公式为:

$$GHG = \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^3 E_k F_{kj} GWP_j + C_m F_m$$

其中, E_k 表示生产 1 GJ 有效能量时在电力运输、生产两个过程中所需要/生成的电能, F_{kj} 表示在第 k 过程中第 j 种温室气体的排放因子。其它符号含义同上文。令电力的使用效率为 e' 。生产 1 GJ 有效能量需要电力为:

$$\frac{1}{e'} \times \frac{10^9}{3.6 \times 10^6} \text{ kWh},$$

即 $\frac{277.78}{e'} \text{ kWh}$ (电厂生产的供终端使用的电力);

运输这些电力所消耗的电力为:

$$\frac{\frac{277.78}{e'}}{1 - 0.0392} \times 0.0392 \text{ kWh},$$

即 $\frac{11.33}{e'} \text{ kWh};$

普通褐煤发电所需开采煤炭为:

$$0.30189 / 0.4023 \times \frac{277.78 + 11.33}{e'} \times \frac{1}{0.99} \times \frac{1}{0.99} \text{ kg},$$

即 $\frac{221.36}{e'} \text{ kg};$

提质褐煤发电所需开采褐煤为:

$$0.2862 / 0.4023 \times \frac{277.78 + 11.33}{e'} \times \frac{1}{0.99} \times \frac{1}{0.99} \text{ kg},$$

即 $\frac{209.85}{e'} \text{ kg}。$

根据以上计算基础可得温室气体排放计量清单, 如表 4 所示。

综上, L-SNG 的全生命周期 CO₂ 当量主要排放区间为 164.76 ~ 1 054.48 kg/GJ; 提质褐煤发电的全生命周期 CO₂ 当量排放区间为 485.53~814.71 kg/GJ;

普通褐煤发电全生命周期 CO₂ 当量排放区间为 509.20~854.43 kg/GJ。由此可见, 由于天然气的主要终端使用能效范围比电力的跨度大, 因此 L-SNG 具有非常大的 GHG 排放区间。当天然气使用具有较高能效时, L-SNG 最为低碳环保, 而当天然气使用能效较低时, L-SNG 全生命周期 GHG 排放水平也有高于提质褐煤发电和普通褐煤发电的可能(图 2)。

根据前文的计算原理, 可得出 CO₂ 当量排放的通用表达式。 e 为终端使用能效, 则 L-SNG 的全生命周期 CO₂ 当量排放为 158.173/ e kg/GJ; 提质褐煤发电的 CO₂ 当量排放为 480.68/ e kg/GJ; 普通褐煤发电的 CO₂ 当量排放为 504.11/ e kg/GJ。由此得出在终端使用能效相同的情况下, L-SNG 的全生命周期 CO₂ 当量排放最低, 提质褐煤发电次之; 而当天然气的终端使用能效高于 32%时, L-SNG 的全生命周期 CO₂ 当量排放低于提质褐煤发电。

3 结论与建议

褐煤制气工厂与提质褐煤发电站均在坑口建设, 在同样不具有碳捕集装备的条件下, L-SNG 全生命周期的 GHG 排放由于天然气使用能效的不同而表现出较大的变动区间, 而当能源的终端使用效率相同时, L-SNG 具有明显的 GHG 减排优势。综上,

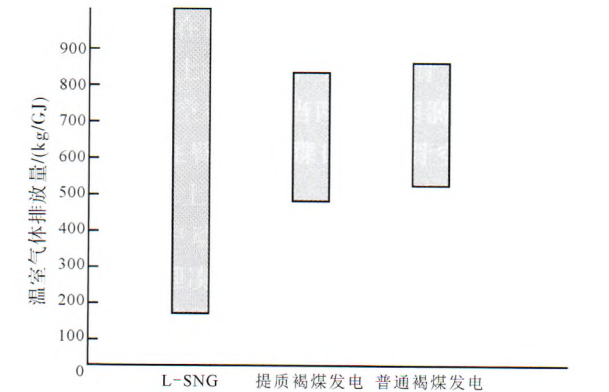


图2 褐煤制气与褐煤提质发电以及普通褐煤发电温室气体排放量区间

Fig. 2 Greenhouse gas emission range of lignite-based synthetic natural gas, upgraded lignite power generation and average lignite power generation

表 4 全生命周期温室气体排放清单(单位: kg/GJ)
Table 4 Greenhouse gas emission of each stage(unit: kg/GJ)

生命周期阶段	褐煤制气(CO ₂ 当量排放)		褐煤提质发电(CO ₂ 当量排放)		普通褐煤发电(CO ₂ 当量排放)	
	高能效	低能效	高能效	低能效	高能效	低能效
褐煤开采	1.87	11.94	2.26	3.80	2.39	4.01
褐煤运输	0	0	0	0	0	0
制气/发电	97.08	621.29	464.33	779.12	486.95	817.08
天然气/电力输送	2.27	14.55	18.94	31.79	19.86	33.34
终端使用	63.54	406.70	0	0	0	0
合计	164.76	1054.48	485.53	814.71	509.20	854.43

仅从碳排放的角度出发, 建议对已有或新建的普通褐煤发电厂增加褐煤干燥装置; 对于已经投产或将要投产的褐煤制气工厂, 国家可采取措施避免其生产的L-SNG用作汽车动力, 鼓励其替代散烧煤进行供暖; 如果需要在L-SNG和提质褐煤发电这两个项目中进行选择, 则要考虑前者较于后者在碳减排上的优势, 再结合成本、水资源等因素进行综合决策。

致谢: 在本文的撰写与修改过程中, 得到煤炭科学研究总院专家及中国地质大学(北京)杜国银教授的指导, 在此表示感谢。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. 12120115057001).

参考文献:

- 百度百科. 2016. 燃气灶[EB/OL]. [2016-2-17]. <http://baike.baidu.com/link?url=PitrHCfoG8ZKGiq3oy-MiE7R4YAs6Z80xQ-IW1EhZ6hnGK1GNFbQOuRNEgur08yV2gG-jRAi5I2EGUqonkg3>.
- 常涤非. 2015. 中国“电地暖”元年[J]. 房地产导刊, 5: 70-71.
- 陈子瞻, 王高尚. 2017. 煤制油成本案例分析及产业前景[J]. 地球学报, 38(1): 109-114.
- 杜学平, 刘是戎, 刘蓉. 2014. 天然气作为汽车替代燃料能源效率分析[J]. 城市燃气, 11: 21-24.
- 付子航. 2010. 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, 30(9): 139-142.
- 郭晓克, 肖锋, 严俊杰, 谭红军, 郭兆君, 刘明. 2011. 高效褐煤发电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 31(26): 23-31.
- 郭志航. 2015. 褐煤热解分级转化多联产工艺的关键问题研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 赖元楷. 2006. 天然气转换的热值标准选择[J]. 油气世界, 3: 25-28.
- 李晓明, 王安建, 于汶加. 2010. 基于能源需求理论的全局 CO₂ 排放趋势分析[J]. 地球学报, 31(5): 741-748.
- 李舟, 佟立志, 孙娟. 2013. 居住建筑分户式壁挂炉与集中采暖对比与分析[J]. 工业锅炉, 4: 30-33.
- 刘睿, 翟相彬. 2014. 中国燃煤电厂碳排放量计算及分析[J]. 生态环境学报, 23(7): 1164-1169.
- 刘银春, 杨光, 常志波, 周玉英, 徐广军. 2007. 天然气长输管道的节能降耗[J]. 天然气技术 1(6): 57-59.
- 刘占成, 王安建, 于汶加, 李铭. 2010. 中国区域碳排放研究[J]. 地球学报, 31(5): 727-732.
- 牛焱. 2005. 褐煤洗选加工的特点及应注意的问题[J]. 煤炭加工与综合利用, 5: 18-19.
- 唐玉婷, 马晓茜, 廖艳芬, 马赟, 赖志毅. 2013. 煤制取天然气全生命周期评价分析[J]. 环境工程, 31(5): 139-142.

- 王秀林, 单彤文, 侯建国, 付子航, 秦峰, 宋鹏飞, 高振. 2015. 煤制天然气与燃煤发电的煤炭能量利用能效研究[J]. 现代化工, 35(12): 6-9.
- 夏德建. 2010. 基于情景分析的发电侧碳排放生命周期计量研究[D]. 重庆: 重庆大学.
- 杨建新, 王如松. 1998. 生命周期评价的回顾与展望[J]. 环境科学进展, 6(2): 21-27.
- 杨通. 2011. 论分户式燃气壁挂炉供热方式在北京市的适用性 [C]//中国建筑学会建筑热能动力分会第十七届学术交流会暨第八届理事会第一次全会议论文集. 太原: 中国建筑学会.
- 张杨, 厉彦忠, 谭宏博, 李广鹏, 刘展, 王春燕. 2013. 天然气与电力长距离联合高效输送的可行性研究[J]. 西安交通大学学报, 47(9): 2-7.
- 张振芳. 2013. 露天煤矿碳排放量核算及碳减排途径研究[D]. 徐州: 中国矿业大学.

References:

- BP. 2014. Statistical Review of World Energy[EB/OL]. [2015-12-15]. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/2014-in-review.html>.
- Baike. 2016. Gas Stove. [EB/OL]. [2016-2-17]. [http://baike.baidu.com/link?url=PitrHCfoG8ZKGiq3oy-MiE7R4YAs6Z80xQ-IW1EhZ6hnGK1GNFbQOuRNEgur08yV2gG-jRAi5I2EGUqonkg3\(in Chinese\)](http://baike.baidu.com/link?url=PitrHCfoG8ZKGiq3oy-MiE7R4YAs6Z80xQ-IW1EhZ6hnGK1GNFbQOuRNEgur08yV2gG-jRAi5I2EGUqonkg3(in Chinese)).
- CHANG Di-fei. 2015. The Primary Era of Floor Heating Using Electricity[J]. Real Estate Biweekby, 5: 70-71(in Chinese).
- CHEN Zi-zhan, WANG Gao-shang. 2017. An Analysis of Cost Case and Industry Prospect of Coal to Liquids [J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(1): 109-114 (in Chinese with English abstract)
- DU Xue-ping, LIU Shi-yu, LIU Rong. 2014. Fuel Energy Efficiency Analysis of Natural gas as a Substitute for Automobile[J]. Urban Gas, 11: 21-24(in Chinese).
- DING Yan-jun, HAN Wei-jian. 2013. Coal-based synthetic natural gas(SNG):A solution to China's energy security and CO₂ reduction?[J]. Energy Policy, 55: 445-453.
- Fueleconomy. 2016. All-Electric Vehicles[EB/OL]. [2016-03-10]. <http://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>.
- FU Zi-hang. 2010. Life cycle assessment of carbon emission from synthetic natural gas (SNG)and its horizontal comparison analysis[J]. Natur.Gas Ind., 30(9): 100-104(in Chinese with English abstract).
- GUO Xiao-ke, XIAO Feng, YAN Jun-jie, TAN Hong-jun, GUO Zhao-jun, LIU Min. 2011. Study on Efficient Lignite-fired Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 31(26): 23-31(in Chinese with English abstract).
- GUO Zhi-hang. 2015. Research on Key Issues of Lignite Pyrolysis-Based Staged Conversion Polygeneration Technology[D].

- Hangzhou: Zhejiang University(in Chinese with English abstract).
- IEA. 2015. Coal Information 2015[R]. Paris: International Energy Agency.
- LAI Yuan-kai.2006. The Calorific Value of Gas Conversion Standard Choice[J].World Oil and Gas, 3: 25-28(in Chinese).
- LI Sheng, GAO Lin, JIN Hong-guang. 2016. Life cycle energy use and GHG emission assessment of coal-based SNG and power cogeneration technology in China. Energy Conversion and Management 112: 91-100.
- LI Xiao-ming, WANG An-jian, YU Wen-jia. 2010. A Trend Analysis of Carbon Dioxide Emissions Based on the Energy Demand[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(5):741-748(in Chinese with English abstract).
- LI Zhou, TONG Li-zhi, SUN Juan. 2013. Comparison and Analysis of Individual Type Wall-hung Gas Boilers Heating and Central Heating of Residential Building[J] Industrial Boiler, 4: 30-33(in Chinese with English abstract).
- LIU Rui, ZHAI Xiang-bin. 2014. Calculation of Carbon Emissions from China Coal Plants and the Reduction Suggestion[J]. Ecology and Environmental Sciences, 23(7): 1164-1169(in Chinese with English abstract).
- LIU Yin-chun, YANG Guang, CHANG Zhi-bo, ZHOU Yu-ying, XU Guang-jun. 2007. Energy Saving of Long Distance Natural Gas Transmission through Pipeline[J]. Natural Gas Technology, 1(6): 57-59(in Chinese with English abstract).
- LIU Zhan-cheng, WANG An-jian, YU Wen-jia, LI Ming. 2010. Research on Regional Carbon Emissions in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(5):727-732(in Chinese with English abstract).
- NIU Yan. 2005. Lignite Washing and Processing Characteristics and Problems That Should Be Paid Attention to[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 5: 18-19.
- JARAMILLO P, GRIFFIN W M, MATHEWS H S. 2007. Comparative Life-Cycle Air Emissions of Coal, Domestic Natural Gas, LNG, and SNG for Electricity Generation[J]. Environ. Sci. Technol., 41: 6290-6296.
- TANG Yu-ting, MA Xiao-qian, LIAO Yan-fen, MA Yun, LAI Zhi-yi. 2013. Life Cycle Assessment on Producing Synthetic Natural Gas from Coal[J]. Environmental Engineering, 31(5): 139-142(in Chinese with English abstract).
- Wikipedia. 2015. Global warming potential[EB/OL]. [2015-12-14]. https://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming_potential.
- WANG Xiu-lin, SHAN Tong-wen, HOU Jian-guo, FU Zi-hang, QIN Feng, SONG Peng-fei, GAO Zhen. 2015. Coal Energy Utilization Efficiency of Coal-to-Synthetic Natural Gas and Coal-fired Power Generation[J]. Modern Chemical Industry, 35(12): 6-9(in Chinese with English abstract).
- XIA De-jian. 2010. The Research on Life Cycle Carbon Emissions Measurement of Electric Power Generation Side Based on the Scenario Analysis Method[D]. Chongqing: Chongqing University(in Chinese with English abstract).
- YANG Chi-jen, JACKSON R B. 2013. China's synthetic natural gas revolution[J]. Nature Climate Change, 3: 852-853.
- YANG Jian-xin, WANG Ru-song. 1998. Retrospect and Prospect of Life Cycle Assessment[J]. Advances in Environmental Science, 6(2): 21-28(in Chinese with English abstract).
- YANG Tong. 2011. The applicability of household type wall-mounted gas furnace heating mode in Beijing[C]// Building Thermal Power Branch, the 17th Academic Communication Conference, the First Plenary Session of the Eighth Council. Taiyuan: The Architectural Society of China(in Chinese).
- ZHANG Yang, LI Yan-zhong, TAN Hong-bo, LI Guang-peng, LIU Zhan, WANG Chun-yan. 2013. Efficient Long-Distance Energy Transmission Conception[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 47(9): 2-7(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhen-fang. 2013. Study on Carbon Emissions Accounting and Carbon Emission Reduction Approach of Surface Coal Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology(in Chinese with English abstract).