

生物质基合成天然气 (BioSNG) 的生命周期评价*

宋国辉 肖 军 沈来宏

(东南大学能源与环境学院 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室 南京 210096)

摘 要 应用生命周期评价方法,以生物质基合成天然气(BioSNG)为评价对象,对秸秆种植收获、运输、工厂建设和拆除、转化、耗电以及SNG使用等阶段进行了清单分析,并进行生命周期评价分析。结果表明,BioSNG生命周期的各种环境影响类型按其在全国一年的相应贡献量由大到小的顺序依次为:WS>EP>AP>GWP>CADP>RI。耗电是BioSNG产品环境影响的主要成因,62.4%的GWP、48.2%的AP、47.8%的CADP和43.1%的RI由耗电环节造成。BioSNG的LCA综合化指标对产率最为敏感,其次是产品电耗,而秸秆收集半径对BioSNG产品的环境影响的作用较小。

关键词 生物质 合成天然气 生命周期 环境影响

一、引 言

天然气是清洁的一次能源燃料和优质的化工原料。随着国民经济的快速发展和人口的不断增长,我国对天然气的需求量越来越大。然而,国内天然气资源紧缺,据预测,2020年我国天然气对外依存度将高达35%^[1]。

基于热化学法的生物质制合成天然气(SNG)则是提高国内天然气产量的一个极具前景的途径。该技术在效率、成本、规模化等方面具有较大优势,易于近期内达到工业化要求。目前,国内外在生物质制SNG技术的可行性、单元技术开发(例如,等温甲烷化流化床反应)、单元技术集成、能量转化利用效率以及经济性等方面开展了一定的研究^[2-6],而关于生物质制SNG技术的环境影响研究相对薄弱。

BioSNG的生产涉及种植收获、运输、工厂建设耗材、生产耗电等一系列环节,需要消耗不再可再生资源 and 能源,并排放一定的污染物。因此,BioSNG是否清洁、或清洁程度还需从生命周期的观点进行研究和认识。Felder和Dones^[7]以瑞士PSI的木材制取SNG技术为原型,针对供热和交通运输两个用途,使用生命周期评价(LCA)、温室气体排放(GHG)核算和外部成本(External Cost)等三种方法对比了SNG与传统燃料的生态影响。结果表明,当对化石燃料的使用考虑较大的权重,或者当计入温室气体排放或外部成本时,SNG比传统燃料具有更佳的环境性能。Steubing等^[8]使用LCA,以瑞士Baden的7.5 MW的BioSNG多联产方案设计数据,研究了以木材为原料的BioSNG产品的环境影响,考虑了加热、燃气蒸汽联合循环、热电联产、天然气汽车等四种方案。评价结果表明:BioSNG在加热和运输上替代油是最佳的方案,替代天然气次之,替代热泵的优势非常微弱,甚至更差。从环境性能和未来需求的角度看,BioSNG作为车用燃料是较好的利用方式。

上述LCA工作并未考虑BioSNG工厂的建设和拆除间接引起的环境影响。不同国家的能源消耗和环境负荷情况不同,这可能会影响LCA结果及其建议,进而可能影响BioSNG用途的选择。LCA也是一种清洁生产设计工具,从LCA角度优化BioSNG生产方案的尝试也鲜有报道。本文目的是根据稻秸进料量为30 t/h的BioSNG生产项目的模拟数据,采用生命周期评价方法,从中国

* 基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2010CB732206、2013CB228106)。

本地化角度研究 BioSNG 的环境影响，并提出生产方案的优化措施。

二、研究对象和评价方法

(一) BioSNG 生产工艺

我国农作物秸秆资源丰富，本文选用稻秸为原料。由于生物质利用规模不宜过大，本文设计进料量为 30 t/h。基于热化学法的生物质制 SNG 的典型生产过程如图 1 所示^[9]，四个主要步骤依次为：

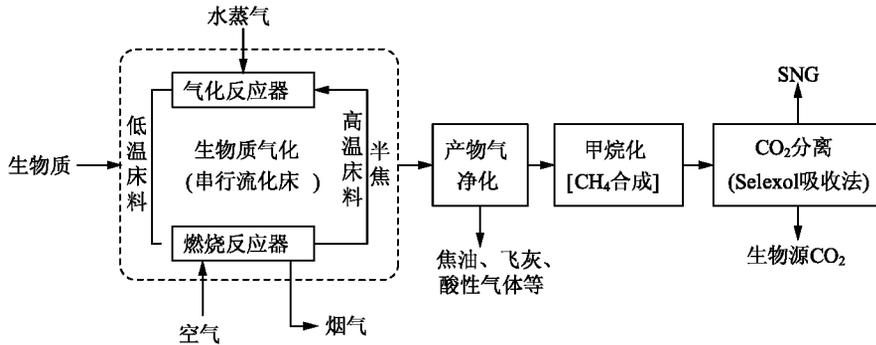


图 1 基于热化学法的生物质制 SNG 的典型工艺流程

(1) 生物质水蒸气气化：本单元采用属于间接供热气化的串行流化床气化装置，它由气化反应器和燃烧反应器组成，可将热解气化和燃烧发生的物理场所分开，两反应器间依靠床料颗粒进行热量传递。基于串行流化床气化装置，可避免气化产物被空气中的 N_2 稀释，从而获得富含 H_2 、 CO 的产物气。

(2) 产物气净化：为了保护后续的压缩机、管道，以及防止甲烷化催化剂中毒失活，需对高温产物气进行净化，去除产物气中的焦油、飞灰、酸性气体（如 H_2S 和 COS ）等杂质。

(3) 甲烷化：以 H_2 、 CO 、 CO_2 和 CH_4 为主要成分的合成气，经过压缩达到设定的甲烷化反应压力后，进入等温流化床甲烷化反应器进行甲烷化反应。甲烷化的作用是将 H_2 和 CO 合成为 CH_4 ，从而提高 CH_4 的浓度并降低 H_2 和 CO 的浓度。

(4) CO_2 分离：甲烷化反应产物（即粗 SNG）以 CH_4 和 CO_2 （约 45 vol%）为主，还含有少量 H_2 和 CO ^[9]。为达到国家技术标准对天然气组分的要求^[10]，必须脱除大部分的 CO_2 。本文设计使用 Selexol 吸收法分离 CO_2 。此外，为了达到管道输送对天然气露点的要求，SNG 还需要进行脱水处理。本文设计 BioSNG 的最终压力为 16 bar。

(二) LCA 系统及边界

本文 BioSNG 的 LCA 评价的功能单位为 $1m^3_{BioSNG}$ （20 °C 和 101.325 kPa），其系统边界如图 2 所示，包括了生物质种植和收获、原料供应、SNG 生产和使用等阶段，还追溯了所需的上游资源和能源投入，其中生产耗电来自电网购电。本评价不考虑收割和运输机器等机械设备的制造、SNG 工厂耗材的运输及其建设能耗、以及 SNG 输送的管道制造等因素。

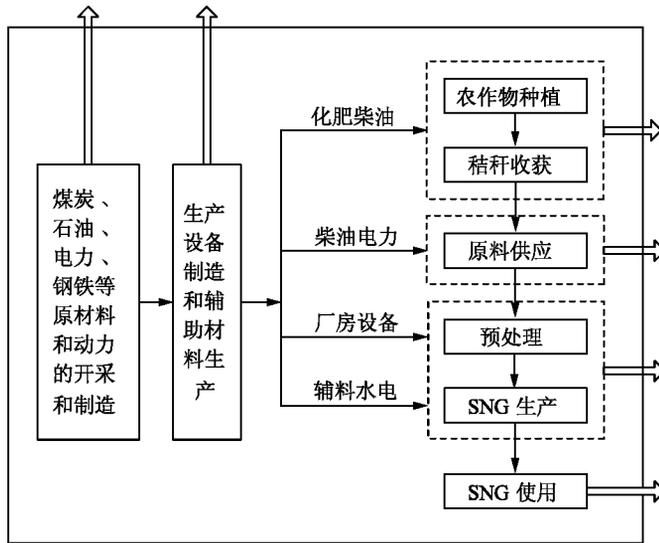


图2 基于电网购电的 BioSNG 的生命周期系统及边界示意图

(三) 环境影响类型及清单物质

为了更客观的认识 BioSNG 可能引起的环境问题，结合我国当前的主要环境污染问题，本文考虑的 6 类环境影响类型及其相应清单物质如下^[11]：

1. 中国非生物资源消耗潜值 (CADP)，相应清单物质：煤、原油、铁、铜、铝和天然气；
2. 全球暖化 (GWP)，相应清单物质：CO₂、CH₄ 和 N₂O；
3. 酸化 (AP)，相应清单物质：NO_x (含 NO、NO₂) 和 SO_x (含 SO₂、SO₃)；
4. 富营养化 (EP)，相应清单物质：COD、TN 和 NH₃ - N；
5. 可吸入无机物 (RI)，相应清单物质：总颗粒物、PM₁₀、CO、NO_x 和 SO_x；
6. 固体废弃物 (WS)，相应清单物质：灰渣、炉渣、粉尘等废弃物。

(四) 清单数据收集

生物质是一种碳中性能源，本评价不计生物源 CO₂。Steubing 等在 BioSNG 产品的 LCA 评价工作采用相同的处理^[8]。

1. 秸秆种植收获 (种收)

在稻秸生长阶段仅考虑农田温室气体 CH₄ 和 N₂O 的排放，以及化肥使用导致的总氮排放^[12]。根据文献^[13]折算可得单位质量秸秆的收割油耗所引起的资源消耗和污染物排放。

2. 原料供应 (运输)

对于 30 t/h 的稻秸消耗量，收集半径不超过 69 km^[14]，宜采用中心料场破碎收集模式，其运输由田间收集至收集点 (即田间运输) 和收集点至工厂 (即路途运输) 构成。假设田间运输和路途运输的平均距离分别为 2 km 和 30 km，其环境影响数据分别使用中国 LCA 基础数据库 (CLCD) 中 2 t 轻型和 8 t 中型柴油货车的运输数据^[15]。

此外，对运输阶段进行以下修正：① 假设秸秆自然风干后含水量为 15 wt%，根据表 1，所需运输的秸秆量应增加 6.9%。② 道路曲折因子为 1.4；秸秆的运输油耗因其堆积密度低的特点而有所增加，该系数设为 1.2。

3. 工厂建设与拆除 (建拆)

BioSNG 工厂建设耗材的估算借鉴了生物质电厂的相关资料^[16]，规模为 30 t/h 的 BioSNG 工厂建设所需的钢、铁、铝和水泥等建材分别为 621 t、4 t、8 t 和 1955 t。假设项目占地面积为 120 亩，建设期间颗粒物排放按 1.1 t/ (aere · mon) 估算，建设期为 12 个月。项目退役解体的

排放以建设期排放的 10% 来估算, 并假设 30% 钢材可以回收。钢、铁、铝和水泥的 LCA 数据同样取自 CLCD。

4. SNG 生产 (转化、耗电)

在工厂内, 生物质先经过预处理 (主要指秸秆破碎、干燥和送料), 然后进入生产转化阶段。转化阶段的原料消耗量和污染物排放量采用 Aspen Plus 模拟数据^[9]。常压气化条件下, 稻秸制取 SNG 过程的最大产率, 以及其相应产物 SNG 组成和产品功耗详见表 1。模拟结果显示, 烟气中 SO_x 和 NO_x 含量分别约为 507 mg/m^3 和 189 mg/m^3 , 约为 GB 13271-2001 最高允许排放浓度的一半^[17], 因此暂不考虑烟气的脱硫脱硝。本文设计使用电袋复合除尘技术净化燃烧烟气, 以达到新国标 GB 13223-2011 的要求^[18]。电袋复合除尘的能耗约为 $2.05 \text{ kJ/m}^3_{\text{烟气}}$ 。

耗电则主要指该生产单元内风机、泵、压缩机等动力设备的耗电 (详见表 1 中的 W_{SNG}), 并包括秸秆预处理和烟气净化的耗电。对于 30t/h 的稻秸进料量, BioSNG 项目的总电耗约为 7705 kW^[9]。电网购电的环境影响数据同样取自 CLCD。

表 1 生物质制 SNG 技术的过程指标

稻秸成分/ (wt%)	数值	SNG 组成/ (vol%)	数值
M ^{at}	9.10	CH ₄	84.05
A ^{db}	11.51	CO	0.09
C ^{db}	38.91	CO ₂	10.54
H ^{db}	5.30	H ₂	3.30
N ^{db}	1.06	HHV _{SNG} (MJ/m ³)	31.5
S ^{db}	0.15	Y _{SNG} (m ³ /kg _{稻秸})	0.303
O ^{db}	43.07	W _{SNG} (kWh/m ³ _{SNG})	0.779

5. SNG 使用

由于本文模拟结果中 BioSNG 的 CO₂ 含量高于 3 vol%, 仅考虑 BioSNG 用于民用加热供暖的使用方案。不计 SNG 在天然气管网中的泄漏量, 只考虑燃烧污染物排放。家用燃气灶的燃烧污染物排放以 CH₄、CO、NO_x 和 SO₂ 为主^[19]。对于 BioSNG, 只需考虑 CH₄、CO 和 NO_x, 其排放量参考值分别为 0.137 g/kg_{NG}、3.72 g/kg_{NG} 和 1.76 g/kg_{NG}。

(五) 评价指标

1. 特征化: 本文采用 CLCD 数据库建议的特征化指标^[15], 产品生命周期的第 j 种环境影响类型的特征化指标 (CI_j) 的计算式为:

$$CI_j = \sum m_i \times cf_i \quad (1)$$

式中, m_i 为产品生命周期中清单物质 i 的总量; cf_i 为清单物质 i 相对于基准物质的特征化因子。

2. 归一化: 为了进一步掌握 BioSNG 各种环境影响类型对全国环境影响的贡献, 通过归一化方法判断 BioSNG 产品生命周期中各种环境类型的重要程度。第 j 种环境影响类型的归一化指标 (NI_j) 的计算式如下:

$$NI_j = \frac{CI_j}{N_{n,j}} \quad (2)$$

式中, CI_j 是第 j 种环境影响类型的特征化指标; $N_{n,j}$ 为该特征化指标的归一化基准值。本文以 2010 年中国的相关资源消耗或污染物排放总量作为归一化源数据^[15]。

3. 综合化指标：加权综合指标 (TEI) 计算式为：

$$TEI = \sum w_k \times NI_k \quad (3)$$

式中, NI_k 是第 k 种环境影响类型的归一化值; w_k 是相应的权重因子。由于不同的个人、组织和群体可能具有不同的倾向性, 所有的加权算法都包含着主观判断, 而不是基于科学依据的, 本文使用 ISCP2009 综合化指标^[15]。

三、BioSNG 的 LCA 结果与讨论

(一) LCA 评价结果

BioSNG 生命周期内各种环境影响类型的特征化值和归一化结果详见表 2。结果显示 BioSNG 生命周期的各种环境影响类型按其对全国一年的相应贡献由大到小的顺序依次为: WS > EP > AP > GWP > CADP > RI。这表明: BioSNG 的 WS 是贡献最大的环境影响类型, 该结果与冯超和马晓茜关于秸秆直燃发电的 LCA 结果一致^[20]。根据 ISCP2009 权重因子, 本文研究的 BioSNG 的综合指标值为 2.40E-12。

表 2 BioSNG 的各项环境影响类型的特征化和归一化指标

	CADP	GWP	AP	EP	RI	WS
特征化指标值	1.37E+00	1.40E+00	9.07E-03	4.63E-04	1.19E-03	1.21E-01
归一化指标值	8.86E-14	1.33E-13	2.49E-13	3.85E-13	2.32E-14	2.69E-11

(二) 贡献分析

各个环节 BioSNG 产品 6 种环境影响类型的特征化指标的贡献详见图 3。

1. 种收对各项环境影响类型均有一定的贡献, 尤其对 EP 和 GWP 的贡献明显。99% 的 EP 由种收阶段造成。水稻种植阶段施用化肥的流失而引起的总氮排放是引起 EP 的主要原因。种收对 GWP 的贡献比例为 32.2%, 主要由稻田排放的 CH_4 引起。

2. 运输仅对 CADP 具有明显的贡献 (约为 17.6%), 但对其他环境影响类型的贡献较小, 一般低于 3%。

3. 建拆仅对 CADP 有明显的贡献, 其贡献比例超过 20%。在建设和拆除耗材不变的前提下, 减少建拆阶段引起 BioSNG 产品生命周期环境影响的主要措施是延长项目寿命。

4. 转换阶段排放的生物质灰渣是 BioSNG 的 WS 的主要成因之一 (贡献幅度高达 56.9%), 很难减弱此类环境影响。由于暂未考虑生物质转化为 SNG 过程中的脱硫和脱硝, 转化对 AP 和 RI 指标的贡献仅次于耗电, 贡献比例分别约为 30% 和 27%。

5. 耗电是 BioSNG 产品生命周期环境影响的主要来源。62.4% 的 GWP、48.2% 的 AP、47.8% 的 CADP 和 43.1% 的 RI 由耗电环节造成。

6. 使用阶段的环境影响类型主要是 AP 和 RI, 但总体上使用阶段对 BioSNG 产品生命周期环境影响的贡献很少, 说明 BioSNG 的使用是比较清洁的。

由上述 LCA 分析结果可见, 电网购电间接引起了较大的非生物资源消耗, 同时造成了较多的温室气体排放, 其原因是我国以煤电为主, 电力生产过程中产生的污染物较多, 我国电力产品的生命周期环境负荷较大。因此, 为削减电网购电间接引起的环境影响, 应寻找清洁的供电方案。

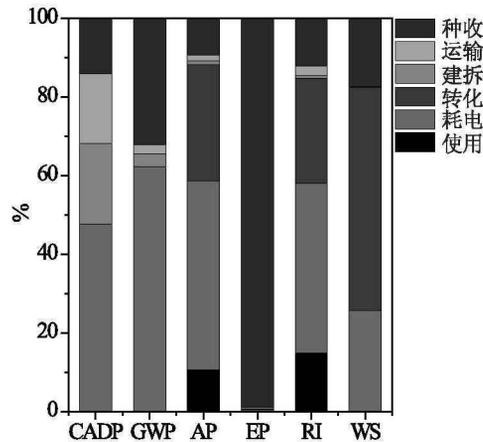


图3 各阶段对 BioSNG 的特征化指标的贡献

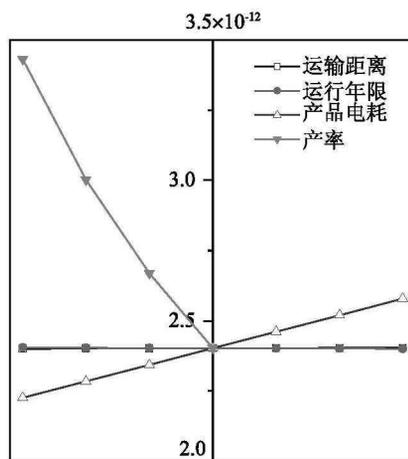


图4 BioSNG 的 LCA 综合指标的敏感度分析

(三) 敏感度分析

本节重点分析 BioSNG 的 LCA 综合指标对产率、运输距离、运行年限、产品电耗等四个变量的敏感度，其中产率变化范围是其基准值的 $-30\% \sim 0\%$ ，后三个变量的变化范围是相应基准值的 $-30\% \sim 30\%$ 。BioSNG 产品的 TEI 受四种变量的影响详见图 4。敏感度绝对值由高到低的排序为：产率 > 产品电耗 > 运行年限 \approx 运料距离，其中产率的敏感度远远大于其他三者的。运输阶段的收集半径不是决定 BioSNG 产品环境影响的重要因素，这与王伟等^[21]对生物质气化发电系统的 LCA 研究结果相一致。

四、结 论

本文从中国本地化的角度对 BioSNG 产品进行了生命周期评价，考虑稻秸的种植收获、秸秆运输、工厂建设和拆除、生产转化、耗电以及家用燃烧使用等阶段。归一化结果显示 BioSNG 生命周期的各种环境影响类型按其对全国一年的相应贡献量由大到小的顺序依次为：WS > EP > AP > GWP > CADP > RI。耗电是 BioSNG 产品环境影响的主要成因，62.4% 的 GWP、48.2% 的 AP、47.8% 的 CADP 和 43.1% 的 RI 由耗电环节造成，这与我国电力结构密切相关。为降低 BioSNG 产品的生命周期环境影响，应寻找清洁的电力供应方案，例如使用余热发电，或使用部分 SNG 产品发电。敏感度分析结果表明敏感度从高到低排序为：产率 > 产品功耗 > 运行年限 \approx 运料距

离。其中, 产率的敏感度远远大于其他三者, 而秸秆收集半径对 BioSNG 产品的环境影响的作用较小。

参 考 文 献

- [1] Ma Y, Li Y. Analysis of the supply - demand status of China' s natural gas to 2020 [J]. *Petroleum Science*, 2010, 7: 132 - 135.
- [2] J Kopyscinski, TJ. Schildhauer, SMA. Biollaz. Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass - A technology review from 1950 to 2009 [J]. *Fuel*, 2010, 89 (8): 1763 - 1783.
- [3] 武宏香, 赵增立, 王小波, 等. 生物质气化制备合成天然气技术的研究进展 [J]. *化工进展*, 2013, 32 (1): 83 - 91.
- [4] Vitasari CR, Jurasek M, Ptasinski KJ. Exergy analysis of biomass - to - synthetic natural gas (SNG) production via indirect gasification of various biomass feedstock [J]. *Energy*, 2011, 36: 3825 - 3837.
- [5] Gassner M, Maréchal F. Thermo - economic process model for thermochemical production of Synthetic Natural Gas (SNG) from lignocellulosic biomass [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33 (11): 1587 - 1604.
- [6] Wirth S, Markard J. Context matters: How existing sectors and competing technologies affect the prospects of the Swiss Bio - SNG innovation system [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2011, 78 (4): 635 - 649.
- [7] Felder R, Dones R. Evaluation of ecological impacts of synthetic natural gas from wood used in current heating and car systems [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31 (6): 403 - 415.
- [8] Steubing B, Zah R, Ludwig C. Life cycle assessment of SNG from wood for heating, electricity, and transportation [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35 (7): 2950 - 2960.
- [9] Song G, Feng F, Xiao J, Shen L. Exergy analysis of synthetic natural gas (SNG) production from agriculture residuals in China. *Journal of Thermal Science* (Accepted).
- [10] 四川石油管理局天然气研究院. GB 17820 - 1999 天然气 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [11] 成都亿科环境科技有限公司. 中国本地化 LCA 平台研发报告 [R]. 2012.
- [12] 衢婷婷. 生物质热解提质转换为高品液体燃料的生命周期评价 [D]. 南京: 东南大学能源与环境学院, 2012.
- [13] 林琳, 赵黛青, 魏国平, 等. 生物质直燃发电系统的生命周期评价 [J]. *水利电力机械*, 2008, 28 (12): 18 - 24.
- [14] 刘钢, 黄明皎. 秸秆发电厂燃料收集半径与装机规模 [J]. *电力建设*, 2011, 32 (3): 72 - 75.
- [15] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30 (10): 2136 - 2144.
- [16] 贾友见, 余志, 吴创之. 生物质气化联合循环发电系统的寿命周期评价 [J]. *太阳能学报*, 25 (1): 56 - 62.
- [17] 国家环境保护总局科技标准司. GB 13271 - 2001 锅炉大气污染物排放标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [18] 中国环境科学研究院, 国电环境保护研究院. GB 13223 - 2011 火电厂大气污染物排放标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社出版, 2012.
- [19] Zhang J, Smith KR, Ma Y, et al. Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34 (26): 4537 - 4549.
- [21] 冯超, 马晓茜. 秸秆直燃发电的生命周期评价 [J]. *太阳能学报*, 2008, 29 (6): 711 - 715.
- [21] 王伟, 赵黛青, 杨浩林, 等. 生物质气化发电系统的生命周期分析和评价方法讨论 [J]. *太阳能学报*, 2005, 26 (6): 752 - 759.